

DOI:10.13296/j.1001-1609.hva.2016.08.009

一种基于皮尔逊相关系数识别变压器励磁涌流的方法

闫富松, 李朝晖

(鲁东大学, 山东 烟台 264025)

摘要: 变压器空载合闸时产生的励磁涌流可能会导致差动保护误动, 因此正确识别励磁涌流和内部故障是变压器保护的主要问题。文中首先分析了变压器励磁涌流和内部故障时基波与二次谐波幅值的动态变化趋势, 并基于两者幅值的变化趋势提出了一种基于相关系数的识别方法: 当两者的相关系数大于某一阈值时, 即判为励磁涌流, 否则判为内部故障。PSCAD/EMTDC 仿真结果验证了新方法在性能上的优越性。

关键词: 励磁涌流; 内部故障; 相关系数

Novel Method to Identify the Inrush Current Based on Pearson Correlation Coefficient

YAN Fusong, LI Chaohui

(Ludong University, Shandong Yantai 264025, China)

Abstract: The differential protection may mis-operate due to the inrush current that caused by transformer energization with no-load. Therefore, the most important issue for the transformer protection is to discriminate the inrush current from internal fault current. This paper first analyzes the change trend of primary and the second harmonic current under inrush current and internal fault. Then, a novel method based on the change trend is proposed. If the coefficient is larger than a setting value, it is inrush current. Otherwise, it is internal fault. The simulation results based on PSCAD/EMTDC presents its superior performance of the method.

Key words: inrush current; internal fault; correlation coefficient

0 引言

变压器是电力系统中最重要设备之一, 变压器的安全稳定运行关系到整个电力系统的稳定工作^[1]。当变压器空载合闸时, 由于变压器发生饱和, 因此会产生幅值较大的励磁涌流现象, 可能会导致差动保护误动。因此正确识别变压器励磁涌流和内部故障成为了变压器保护的重要研究内容。

传统成熟的励磁涌流识别方案包括二次谐波制动原理和间断角闭锁原理^[2-20], 但这两种方案都存在一定的弊端, 如系统中二次谐波含量减小时, 将导致二次谐波制动原理失效^[6]。另外某些情况下, 三相涌流的间断角将会消失或者变的很小, 则也会导致基于间断角原理的涌流闭锁算法灵敏度下降。针

对上述问题, 国内外学者提出了各种各样新的励磁涌流鉴别判据, 如差有功法, 磁通特性法等^[2-5], 该方法需要用到电压互感器, 增加了保护配置的复杂性及增加了 PT 断线的可能性。

文中详细分析了变压器在内部故障和涌流情况下基波与二次谐波幅值的衰减情况, 进而通过皮尔逊相关系数来表征基波与二次谐波幅值的变化趋势是否一致: 如果相关系数较大, 则判为励磁涌流, 否则判为内部故障。新的识别方法在变压器空载合闸于内部故障时仍然适用。最后基于 PSCAD/EMTDC 仿真结果验证了结论的正确性。

1 新方法的基本原理与实现方案

1.1 新方法的基本原理

为了防止励磁涌流引起差动保护误动, 现场当

收稿日期: 2016-02-10; 修回日期: 2016-03-23

基金项目: 山东省自然科学基金(1512065SD05); 山东省教育厅科学研究项目(ZH2015214)。

Project Supported by Natural Science Foundation of Shandong Province(1512065SD05), Shandong Province Higher Educational Science and Technology Program(ZH2015214).

中都配置了二次谐波制动环节

$$I_2/I_1 \geq \delta. \quad (1)$$

式(1)中: I_2 、 I_1 分别表示差流中的二次谐波与基波幅值; δ 为门槛值, 一般设置为 15%~20%。当差流中的二次谐波比大于 δ 时, 闭锁差动保护, 否则开放保护。

事实上, 变压器励磁涌流与多种因素有关, 比如断路器合闸角、剩磁等因素。但只要空载合闸引起了励磁涌流, 式(1)在一般情形下都会成立, 这是因为差流中的基波与二次谐波比是一个动态变化过程, 下面予以详细分析。

当变压器发生内部故障时, 差流中的基波分量的幅值一般会稳定在一个较大的数值上, 但是二次谐波的幅值会迅速衰减到一个稳定值 (可能为零), 如图 1(a)所示。这样差流中的二次谐波比会立刻衰减到门槛值以下, 不符合差动保护的制动逻辑, 保护能可靠动作; 但当发生励磁涌流时, 基波与二次谐波幅值的衰减具有同步性, 如图 1(b)所示。即当变压器发生励磁涌流时, 涌流中不但含有大量的二次谐波, 而且与基波的衰减速度几乎相当, 因此导致了涌流中的二次谐波比稳定在一个较大的数值上, 差动保护可靠闭锁。

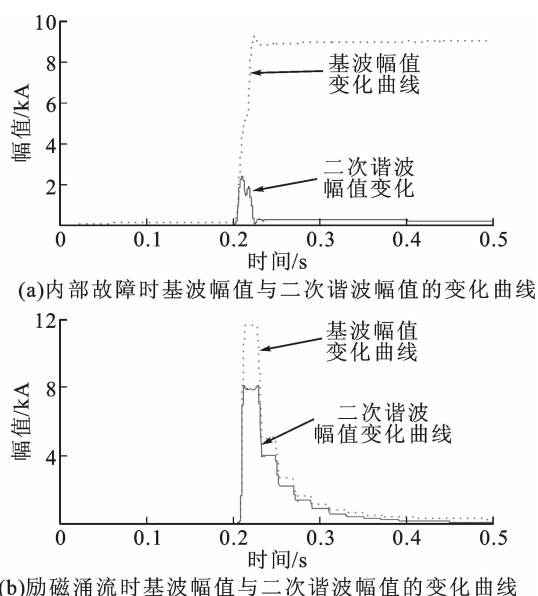


图 1 基波与二次谐波幅值变化曲线

Fig. 1 The change curve of amplitude of the primary and the second harmonic currents

通过上述分析可以得到如下结论: 变压器内部故障时, 基波幅值和二次谐波幅值衰减差异很大; 而变压器涌流时, 基波与二次谐波幅值衰减同步。因此可以从基波与二次谐波幅值衰减趋势是否一致的视角出发来识别变压器励磁涌流。为此, 文中利用皮尔逊相关系数来表征基波与二次谐波的衰减趋势。

1.2 实现方案

为了表征基波幅值与二次谐波幅值的衰减特性, 文中引进 Pearson(皮尔逊)相关系数。Pearson 相关系数是用来描述不同信号形状的相似程度。比如对于两个不同的采样信号: $x=\{x_1, x_2, \dots, x_n\}$, $y=\{y_1, y_2, \dots, y_n\}$, 定义两者之间的相关系数为

$$\gamma(x, y) = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n x_j)(y_i - \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n y_j)}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n x_j)^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (y_i - \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n y_j)^2}}. \quad (2)$$

式(2)中, $\gamma(x, y)$ 表示信号 x 与 y 之间的相关系数, $\gamma(x, y) \in [-1, +1]$, 其中 +1 表示两个信号之间是完全的线性正相关; -1 表示两个信号之间完全的线性负相关, $\gamma(x, y)$ 越大, 表示两个信号之间的相似程度越大; 反之越小。

通过对 Pearson 相关系数的描述可以看出, 当变压器发生励磁涌流时, 基波与二次谐波的幅值变化之间的 Pearson 相关系数 $\gamma(x, y) \approx 1$; 内部故障时基波与二次谐波的幅值变化之间的 Pearson 相关系数 $\gamma(x, y) < 1$ 。因此可以通过设定一个门槛值 γ_{set} 来正确区分励磁涌流和内部故障

$$\begin{cases} \gamma > \gamma_{\text{set}} & \text{励磁涌流} \\ \gamma \leq \gamma_{\text{set}} & \text{内部故障} \end{cases}. \quad (3)$$

需要注意的是, 上述的分析都没有考虑到基波与二次谐波幅值的具体大小, 只考虑了幅值的变化特性, 这是与传统的谐波制动最大不同之处, 因此也带来了如下优势:

1) 能可靠地识别励磁涌流和变压器内部故障。由于对称性涌流时, 涌流中基波与二次谐波的性质与不对称涌流时相同, 只是缺少了非周期分量。因此对称性涌流中基波与二次谐波的幅值变化趋势与不对称涌流时仍然相同, 所以新的识别方法同样适用于对称性涌流;

2) 随着电力电子装置的大量使用, 当变压器内部故障时二次谐波可能较大, 涌流时二次谐波可能会很小^[6], 这就导致了二次谐波比可能大于整定值, 进而导致保护拒动。但此时基波的衰减速度仍远大于二次谐波衰减速度^[6], 因此新的识别方法仍能够正确识别;

3) 当变压器空载合闸于故障时, 如果故障较为严重, 此时变压器的外部特征与内部故障相似, 此时皮尔逊相关系数较小, 可以可靠地判为内部故障; 但如果故障较为轻微, 空载合闸刚结束时, 涌流占主导地位, 此时新方法可能误判。但随着时间的推移, 磁链开始衰减, 即涌流逐渐消失,

此时内部故障特征逐渐占优,保护仍能延时切除故障。

2 仿真验证

基于 PSCAD/EMTDC 搭建了如图 2 所示的仿真模型,变压器在 0.1 s 空载合闸。利用全周傅氏算法计算基波和二次谐波,取 $\gamma_{\text{set}}=0.75$ 。变压器容量为 500 MVA,频率为 50 Hz,空载损耗为 0.05 p.u.,接线方式为 YD11。

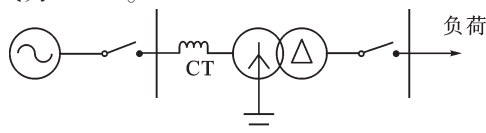
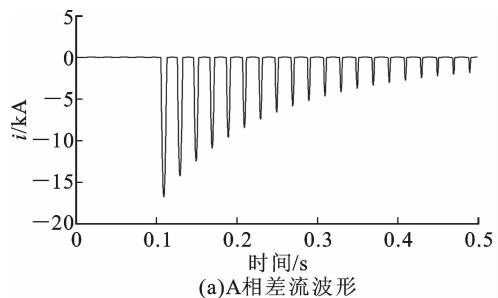


图 2 仿真模型

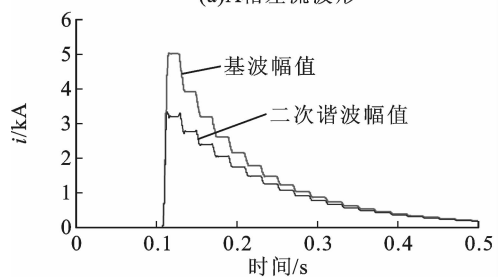
Fig. 2 The simulation model

2.1 励磁涌流仿真分析

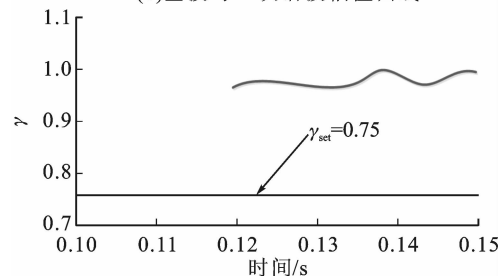
变压器空载合闸时 A 相差流波形、差流的基波、二次谐波幅值以及两者相关系数的变化曲线见图 3。通过图 3(a)可以看出,变压器空载合闸产生了励磁涌流现象。通过图 3(b)可以看出,此时差流的基波、二次谐波幅值变化趋势相一致,因此两者相关系数较大,如图 3(c)所示,因此可以准确地判为变压器涌流现象,差动保护闭锁。



(a) A 相差流波形



(b) 基波与二次谐波幅值曲线



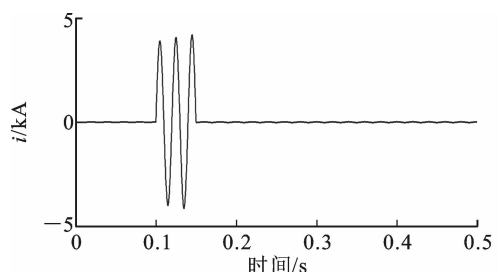
(c) 相关系数

图 3 励磁涌流仿真结果

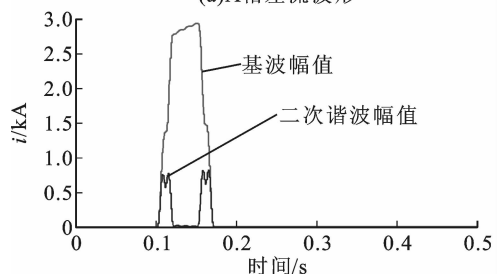
Fig. 3 The simulation results under inrush current

2.2 变压器内部故障仿真分析

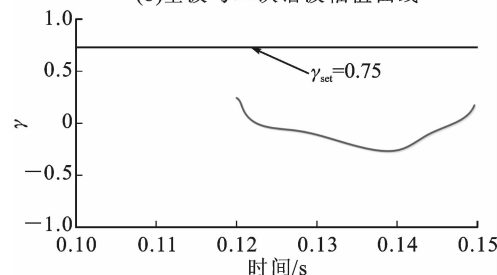
变压器内部故障时 A 相差流波形、差流的基波、二次谐波幅值以及两者相关系数的变化曲线见图 4。通过图 4(a)可以看出,变压器内部故障时差流较大。通过图 4(b)可以看出,此时差流的基波、二次谐波幅值变化趋势差异较大,因此两者相关系数较小,甚至出现负值,如图 4(c)所示,因此可以准确地判为变压器内部故障,差动保护可靠动作。



(a) A 相差流波形



(b) 基波与二次谐波幅值曲线



(c) 相关系数

图 4 变压器内部故障仿真结果

Fig. 4 The simulation results under internal fault

2.3 空投于轻微匝间故障仿真分析

图 5 给出了变压器空载合闸与轻微匝间故障时(5%匝间短路)A 相差流波形、差流的基波、二次谐波幅值以及两者相关系数的变化曲线。通过图 5(a)可以看出,此时差流偏向时间轴一侧,且基波与二次谐波幅值的变化趋势有所差异,但差别不大,如图 5(b)所示。通过图 5(c)可以看出,故障刚开始时,相关系数大于整定值,判为涌流,差动保护闭锁;但随着时间的推移,相关系数逐渐低于门槛值,判为内部故障,保护延迟动作。但事实上,对于变压器轻微故障,由于故障电流不大,根据继电保护的要求,可以延迟将故障予以切除。

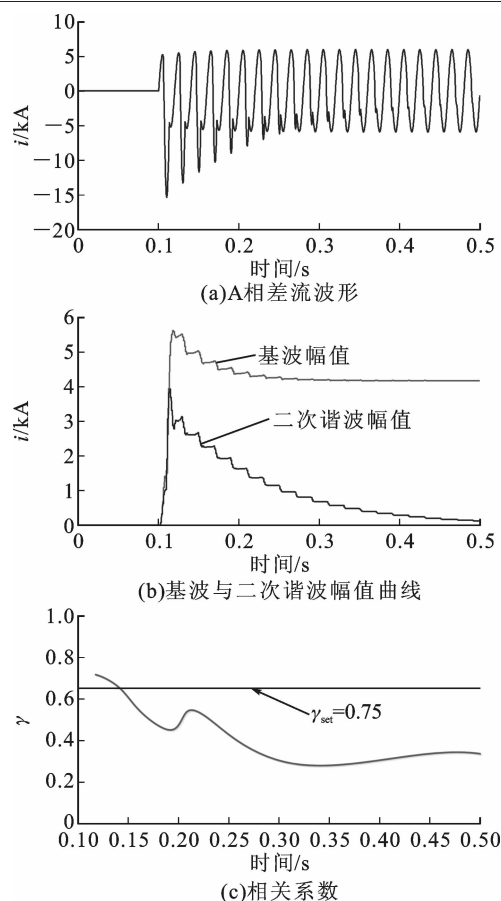


图5 变压器空载合闸于轻微故障时仿真结果

Fig. 5 Simulation results during transformer energization without load under slight fault

2.4 空投于变压器严重故障仿真分析

变压器空载合闸与严重故障时(A相引出线接地故障)A相差流波形、差流的基波、二次谐波幅值以及两者相关系数的变化曲线见图6。通过图6(a)可以看出,此时差流很大,且差流完全体现了内部故障的特征。因此此时基波与二次谐波幅值的变化趋势差别很大,如图6(b)所示。通过图6(c)可以看出,相关系数低于门槛值,判为内部故障,保护能可靠动作。

3 结论

为了能够快速正确地识别变压器的励磁涌流和内部故障,论文提出了一种基于Pearson相关系数识别的新方法。该方法的主要特点包括:

1)该方法很巧妙地利用了励磁涌流和内部故障时基波与二次谐波衰减特点的不同,提出了利用Pearson相关系数来客观描述这种衰减特点。

2)由于新的识别方法是利用了基波与二次谐波的衰减特性,并没有利用到两者的幅值。因此当励磁涌流时二次谐波较小或者内部故障时二次谐波

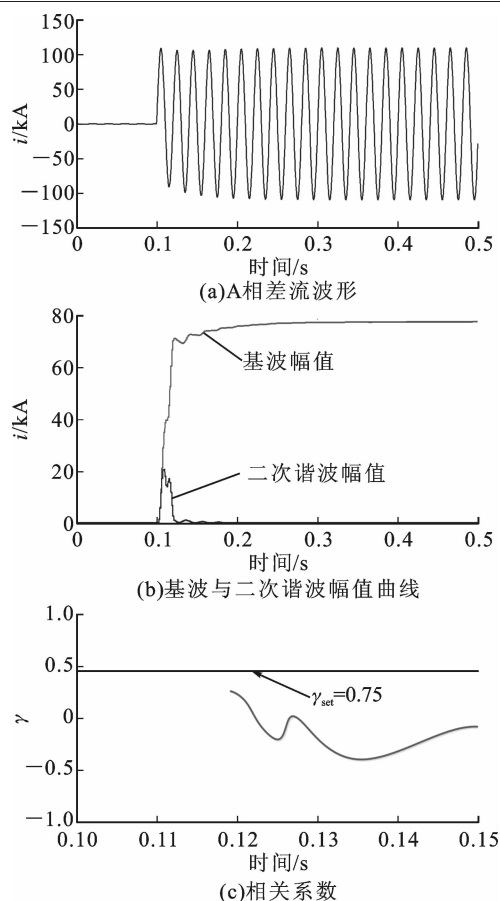


图6 变压器空载合闸于严重故障时仿真结果

Fig. 6 Simulation results during transformer energization without load under sever fault

较大时都可以适用。

3)当变压器带故障空载合闸时,仍然也能正确识别:对于轻微的匝间的故障时保护延迟动作,对于严重故障时,保护能快速动作将故障予以切除。

因此,总体上新涌流识别方法在性能上具有较强的优越性。

参考文献:

- [1] THORP J S, PHADKE A G. A microprocessor based three phase transformer differential relay[J]. IEEE Trans. Power Appl. Syst., 1982(PAS-101):426-432.
 - [2] YABE K. Power differential method for discrimination between fault and magnetizing inrush current in transformers[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1997, 12(3): 1109-1118.
 - [3] 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 Zengping, YANG Qixun. Research on novel transformer protection based on the characteristics of voltage and differential current[J]. Proceedings of the CSEE,

- 2004,24(2):61-65.
- [4] 孙志杰,曾献华,汤汉松,等. 磁通制动原理在变压器差动保护中应用[J]. 电力自动化设备,2005,25(1):79-81.
SUN Zhijie,ZENG Xianhua,TANG Hansong,et al. Application of flux restraint theory in transformer differential protection[J]. Electric Power Automation Equipment,2005,25(1):79-81.
- [5] 赵永彬,陆于平. 基于磁通对称特性的变压器励磁涌流判别新算法[J]. 电工技术学报,2007,22(12):66-71.
ZHAO Yongbin,LU Yuping. A new algorithm based on flux symmetry character for judging transformer inrush current[J]. Transactions of China Electrotechnical Society,2007,22(12):66-71.
- [6] 黄少锋,申洪明,刘欣,等. 基于能量信息的变压器励磁涌流识别方法[J]. 电力系统自动化,2014,38(18):110-113.
HUANG Shaofeng,SHEN Hongming,LIU Xin,et al. A novel identification criterion for inrush current based on energy information[J]. Automation of Electric Power Systems,2014,38(18):110-113.
- [7] 刘鹏辉,黄纯,江亚群,等. 基于峭度系数的变压器励磁涌流识别方法[J]. 电网技术,2015,39(7):2023-2028.
LIU Penghui,HUANG Chun,JIANG Yaquin,et al. An approach to identify inrush current of transformers based on the kurtosis coefficient[J]. Power System Technology,2015,39(7):2023-2028.
- [8] 闫富平,段建东,李笑,等. 利用动态四边形分析的配电网励磁涌流识别方法[J]. 电网技术,2015,3(7):2017-2022.
YAN Fuping,DUAN Jiandong,LI Xiao,et al. Identification method of inrush current in distribution network based on analysis of dynamic quadrilateral[J]. Power System Technology,2015,3(7):2017-2022.
- [9] 付丰年,沈恒毅,吕杰. 关于核电主变励磁涌流的分析及抑制措施研究[J]. 高压电器,2015,51(6):86-89.
FU Fengnian,SHEN Hengyi,LYU Jie. Analysis on inrush current and inhibition methods of main transformer in nuclear power plant[J]. High Voltage Apparatus,2015,51(6):86-89.
- [10] 刘晓华,黄静,阮绵晖,等. 一种计算空投变压器励磁涌流最大值的方法[J]. 高压电器,2014,50(4):120-124.
LIU Xiaohua,HUANG Jing,RUAN Mianhui,et al. Method to estimate maximum inrush current caused by energizing no-load transformer[J]. High Voltage Apparatus,2014,50(4):120-124.
- [11] 范兴明,葛琳,张鑫,等. 基于选相合闸技术的变压器励磁涌流的仿真分析[J]. 高压电器,2014,50(2):54-59.
FAN Xingming,GE Lin,ZHANG Xin,et al. Analysis and simulation of power transformer inrush current based on the phase selection switch technology[J]. High Voltage Apparatus,2014,50(2):54-59.
- [12] 李山. 基于 EMTPE 的 750 kV 空载变压器励磁涌流仿真研究[J]. 高压电器,2013,49(1):101-106.
LI Shan. Simulation of 750 kV unloaded transformer excitation surge based on software EMEP[J]. High Voltage Apparatus,2013,49(1):101-106.
- [13] 郑涛,刘万顺,吴春华,等. 基于瞬时功率的变压器励磁涌流和内部故障电流识别新方法[J]. 电力系统自动化,2003,27(23):51-55.
ZHENG Tao,LIU Wanshun,WU Chunhua,et al. A new approach to the discrimination between inrush current and internal fault current based on instantaneous power[J]. Automation of Electric Power Systems,2003,27(23):51-55.
- [14] 文超,黄纯,胡鹏,等. 利用波形非正弦度分形估计值识别励磁涌流[J]. 电力系统及其自动化学报,2012,24(4):71-76.
WEN Chao,HUANG Chun,HU Peng,et al. Identification of transformer inrush current by using fractal evaluation of waveform non-sinusoidal level[J]. Proceedings of the CSU-EPSA,2012,24(4):71-76.
- [15] 金恩淑,李晓娜,宋晓刚,等. 自适应变压器励磁涌流判据研究[J]. 电力系统保护与控制,2013,41(20):41-46.
JIN Enshu,LI Xiaona,SONG Xiaogang,et al. Study on adaptive criterion of transformer magnetizing inrush current[J]. Power System Protection and Control,2013,41(20):41-46.
- [16] 朱可,姜杰,张太勤. 基于等效瞬时电感参数辨识的变压器励磁涌流判别方法[J]. 电力系统保护与控制,2010,38(20):12-16.
ZHU Ke,JIANG Jie,ZHANG Taiqin. Distinguishing magnetizing inrush based on characteristic of equivalent instantaneous inductance[J]. Power System Protection and Control,2010,38(20):12-16.
- [17] 王雪,王增平. 基于 Park 矢量模频率特征的变压器励磁涌流识别方法[J]. 电力系统保护与控制,2012,40(19):24-29.
WANG Xue,WANG Zengping. A method for identifying transformer inrush currents based on the frequency characteristics of the Park's vector modulus[J]. Power System Protection and Control,2012,40(19):24-29.
- [18] 卓元志,李康,赵斌,等. 变压器三相涌流波形特征分析及判别方法研究[J]. 电网与清洁能源,2012,28(6):44-48.
ZHUO Yuanzhi,LI Kang,ZHAO Bin,et al. Analysis and assessment methods of waveform characteristics of three-phase transformer inrush current[J]. Advances of Power System & Hydroelectric Engineering,2012,28(6):44-48.
- [19] 何源. 电力变压器空载合闸励磁涌流的辨识研究[D]. 重庆:重庆大学,2013.
HE Yuan. Distinguishing magnetizing inrush based on no-load (下转第 63 页)

- 南交通大学, 2006.
- HUANG Chengti. Research of Hilbert-Huang transform and its application[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2006.
- [11] NIE Chunyan, SHI Yaowu. The reaserch of weak signal detection based on cross-orrelation and chaos theory[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2001, 22(1): 32-35.
- [12] 司大军, 束洪春, 陈学允, 等. 输电线路雷击的电磁暂态特征分析及其识别方法研究[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(7): 64-69.
- SI Dajun, SHU Hongchun, CHEN Xueyun, et al. Study on characteristics and identification of transients on transmission lines caused by lightning stroke[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(7): 64-69.
- [13] WU Zhaohua, HUANG N E. A study of the characteristics of white noise using the empirical mode decomposition method[J]. Proc. Roy. Soc. London A, 2004 (460): 1594-1611.
- [14] VINCENT H T, HU S L J, HOU Z. Damage detection using empirical mode decomposition method and a comparison with wavelet analysis[C]//Proceedings of the Second International Workshop 011 Structural Health Monitoring. [S.l.]: Stanford, 1998: 891-900.
- [15] ZHU X, SHEN Z, ECKERMAN N D. Gravity wave characteristics in the middle atmosphere derived from the empirical mode decomposition method[J]. Journal of Geophysical Research, 1997, 102(D14): 16545-16561.
- [16] COHEN L. Time-frequency analysis: Theory and application [Z]. Englewood Cliffs, NJ: Prentice Hall, 1995.
- [17] YANG Hongying, YE Wu. Research and development of fault detection based on chaos theory for dynamic systems [J]. Automation & Instrumentation, 2007(1): 1-4.
- [18] LI Donghui, JIA Wei. Application of chaos theory in grounding fault detection of DC power supply system[J]. High Voltage Engineering, 2005, 31(11): 79-82.
- [19] 吕金虎, 陆君安, 陈士华. 混沌时间序列分析及其应用[M]. 武汉: 武汉大学出版社, 2002.
- LYU Jinhu, LU Jun'an, CHEN Shihua. Chaotic time series analysis and its application[M]. Wuhan: Wuhan University Press, 2002.
- [20] 赵彤, 李庆民, 陈平. OLTC 振动信号特征提取的动力学分析方法[J]. 电工技术学报, 2007, 22(1): 41-46.
- ZHAO Tong, LI Qingmin, CHEN Ping. Dynamic analysis method for feature extraction of mechanical vibration signals of on-load tap changers[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2007, 22(1): 41-46.
- [21] 张丽丽, 雷友发. 一个三维非线性系统的混沌动力学特征[J]. 动力学与控制学报, 2006, 4(1): 5-6.
- ZHANG Lili, LEI Youfa. The chaotic characters of a 3-dimensional nonlinear dynamics[J]. Journal of Dynamics and Control, 2006, 4(1): 5-6.

李毅(1983—), 男, 博士研究生, 工程师, 主要从事电力系统分析与控制、高电压与绝缘技术等方面的研究。

吴政球(1963—), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 从事电力系统分析与控制、分布式发电方面的研究。

李建奇(1962—), 男, 教授, 硕士生导师, 从事电力企业管理等方面的研究。

(上接第 56 页)

- load closing power transformer[D]. Chongqing: Chongqing University, 2013.
- [20] 金恩淑, 李晓娜, 夏国武, 等. 基于正序分量的变压器励磁涌流新判据[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(23): 7-11.
- JIN Enshu, LI Xiaona, XIA Guowu, et al. New criterion of transformer magnetizing inrush current based on positive sequence component[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(23): 7-11.
- 闫富松(1975—), 男, 工程师, 硕士, 主要从事供配电管理, 研究方向为电力系统保护与控制。
- 李朝晖(1976—), 男, 博士研究生, 研究方向为电力系统及其自动化。