

doi:10.11835/j.issn.1000-582X.2014.08.005

# 利用正弦拟合法的铁磁谐振与单相接地辨识

姜 杰<sup>1</sup>, 赵广泉<sup>1</sup>, 张 肖<sup>2</sup>, 单玉青<sup>3</sup>, 郭 威<sup>1</sup>

(1. 重庆大学 输配电装备及系统安全与新技术国家重点实验室, 重庆 400030;

2. 唐山供电公司, 河北 唐山 063000; 3. 唐山三友集团, 河北 唐山 063305)

**摘 要:**中性点不接地配电网中,电压互感器(PT)引起的铁磁谐振时常发生,导致系统零序电压升高,其现象与单相接地故障相似,容易造成接地选线装置误动。为此提出一种铁磁谐振与单相接地辨识的新方法,该方法以频率 50 Hz 的正弦函数为模型对零序电压采样数据进行拟合,通过正弦函数的幅值判断零序电压是否为基频量。在零序电压为基频量的情况下,根据基频谐振时系统零序电压波形畸变的特点,计算波形畸变度以区分基频谐振与单相接地。仿真数据表明该方法能够有效辨识铁磁谐振与单相接地。

**关键词:**铁磁谐振;正弦拟合;波形畸变度;基频谐振;单相接地

**中图分类号:**TM771

**文献标志码:**A

**文章编号:**1000-582X(2014)08-034-07

## Discriminate ferroresonance from single-phase earth fault in sine fitting algorithm

JIANG Jie<sup>1</sup>, ZHAO Guangquan<sup>1</sup>, ZHANG Xiao<sup>2</sup>, SHAN Yuqing<sup>3</sup>, GUO Wei<sup>1</sup>

(1. State Key Laboratory of Power Transmission Equipments & System Security and New Technology,

Chongqing 400030, China; 2. Tangshan Power Supply Company, Tangshan, Hebei 063000, China;

3. Tangshan Sanyou Group, Tangshan 063305, Hebei, China)

**Abstract:** The potential transformer ferroresonance often occurs in neutral non-grounding distribution network, which cause zero sequence voltage rise. The phenomenon is similar to single-phase earth fault, and it may result in maloperation of line-selecting earthing devices. A new method is presented for discriminating between ferroresonance and single-phase earth fault. First, sampled data of zero-sequence voltage is fitted to sine function of 50 Hz, and it can get that the zero sequence voltage is power frequency or not by analyzing the amplitude. Second, to the case that zero-sequence voltage is power frequency, the fundamental frequency resonance can be correctly identified from single-phase earth fault by calculating waveform distortion level as zero-sequence voltage is distorted if fundamental frequency resonance occurred. Simulation data show that the method can discriminate single-phase earth and ferromagnetic resonance effectively.

**Key words:** ferroresonance; sine fitting; waveform distortion level; fundamental frequency resonance; single-phase earth fault

收稿日期: 2013-08-20

基金项目: 国家重点实验室访问学者基金资助项目(2007DA10512709403)

作者简介: 姜杰(1958-), 男, 重庆大学副教授, 硕士生导师, 主要从事电力系统保护与综合自动化方向的研究,

(Tel)13926134336; (E-mail)jiang\_jie1958@163.com。

在中性点不接地配电网中,单相接地是最常见的故障。系统发生单相接地故障时,须尽快选出故障线路并予以切除,以避免发展为两相接地短路<sup>[1]</sup>。然而,系统发生铁磁谐振时,其现象与单相接地类似,电压互感器的开口三角处也会出现零序电压,接地选线装置可能误判为单相接地<sup>[2-3]</sup>,给出一个没有意义的选线结果。所以,正确辨识铁磁谐振与单相接地是进行接地选线的前提。

铁磁谐振分为分频、基频与倍频谐振,现有方法大都利用频谱分析辨识分频谐振与倍频谐振。然而,基频谐振时系统零序电压为基频量,且各相对地电压及零序电压变化与单相接地时非常相似<sup>[4]</sup>,因此,如何区分基频谐振与单相接地是故障辨识的难点。文献[5]通过测量线路是否存在容性零序电流来区分基频谐振与单相接地,但系统只有一条馈线时,此种方法并不适用。文献[6]提出利用零序电压幅值变化率区分基频谐振与单相接地,然而两种故障的电压幅值变化率都很小,容易受信号噪声及计算误差的影响,难以达到理想效果。文献[7]提出利用分形理论分析暂态零序信号,根据其在不同故障下具有不同分形特征辨识故障类型。但由于暂态过程短,需要很高的采样频率,致使该方法难以应用于工程实际。文献[8]提出了基于零序电压与三相电压综合对比的方法辨识基频谐振与单相接地,此方法能够有效辨识绝大多数基频谐振与单相接地,但仍然存在无法有效辨识的情况。

为解决铁磁谐振与单相接地辨识问题,提出了正弦拟合的辨识方法。该方法以 50 Hz 的正弦函数作为信号模型,首先,利用最小二乘法将采样所得的零序电压波形数据进行拟合;然后,通过拟合函数的幅值判断零序电压的频率是否为基频;最后,针对零序电压为基频量的情况,以拟合得到的正弦信号为参照波形,计算零序电压的波形畸变度,以波形畸变度区分基频谐振与单相接地。通过仿真数据对本方法进行验证,计算结果表明该方法能够有效辨识铁磁谐振与单相接地。

## 1 铁磁谐振

图 1 为带有 Y<sub>0</sub> 接线电压互感器的中性点不接地配电网的接线图,其中: $\dot{E}_A$ 、 $\dot{E}_B$ 、 $\dot{E}_C$  为三相电源电动势, $L_A$ 、 $L_B$ 、 $L_C$  为具有饱和特性的各相电压互感器励磁电感, $C_0$  为系统各相对地等效电容。

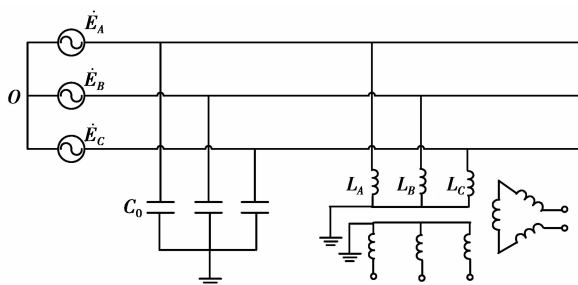


图 1 中性点不接地配电网的接线图

当系统正常运行时,PT 工作在非饱和区,各相励磁电感相同,系统三相电压平衡,中性点位移电压很小。当单相接地故障消失或电源合闸空载母线时,可能造成 PT 的三相励磁电感饱和程度不同,发生铁磁谐振现象。

Peterson H A 对铁磁谐振进行了较全面的试验研究<sup>[9]</sup>,其中: $X_{C_0} = 1/\omega C_0$  为系统各相对地容抗; $X_m$  为电压互感器在额定线电压下的励磁感抗。试验表明随着  $X_{C_0}/X_m$  比值的增大,系统分别处于 1/2 分频、基频和倍频谐振区域,具体情况为:

- 1)  $X_{C_0}/X_m = 0.01 \sim 0.07$  时,发生 1/2 分频谐振;
- 2)  $X_{C_0}/X_m = 0.07 \sim 0.55$  时,发生基频谐振;
- 3)  $X_{C_0}/X_m = 0.55 \sim 2.8$  时,发生倍频谐振;
- 4)  $X_{C_0}/X_m > 2.8$  或  $X_{C_0}/X_m < 0.01$  时,不会发生铁磁谐振。

针对 PT 铁磁谐振现象,国内学者也相继做了大量模拟与仿真试验<sup>[10-14]</sup>,试验表明谐振区域与 PT 的励磁特性有关,磁化曲线越容易饱和,系统发生铁磁谐振的几率越大,谐振区域也越大<sup>[15]</sup>。实测表明,发生分频谐振时,其谐振频率并不是严格的 25 Hz,而是略低于 25 Hz,约为 24.2~24.6 Hz。

## 2 正弦拟合法的基本原理

### 2.1 正弦函数的拟合

正弦拟合法是一种基于参数估计的拟合方法,其以正弦函数作为信号模型,利用最小二乘法对采样数据进行拟合,估计出正弦信号的频率、幅值与相位,从而得到其表达式<sup>[16]</sup>。在一些应用计算过程中,正弦信号的频率是已知的,幅值与相位是未知的,如中国电网的额定频率为 50 Hz,在实际运行中,各跨省电力系统频率的允许偏差都保持在  $+0.1 \sim -0.1$  Hz 的范围内,电压频率目前在电能质量中最有保证<sup>[17]</sup>。针对这种频率已知情况,设拟合的正弦信号模型为

$$y(t) = A \sin(100\pi t + \theta), \quad (1)$$

式中:  $y(t)$  为拟合信号的瞬时值;  $A$ 、 $\theta$  分别为拟合正弦信号的幅值与初相位。

将式(1)展开得

$$y(t) = A \sin \theta \cos(100\pi t) + b \cos \theta \sin(100\pi t), \quad (2)$$

令  $a = A \sin \theta$ ,  $b = A \cos \theta$ , 则有

$$y(t) = a \cos(100\pi t) + b \sin(100\pi t), \quad (3)$$

这样,待估计参数就由  $A$ 、 $\theta$  变为  $a$ 、 $b$ 。

实际的采样数据与其时间序列均是离散化的,定义采样间隔为  $\Delta t$ , 设数据记录序列为时刻  $0, \Delta t, 2\Delta t, \dots, (n-1)\Delta t$  的采样数据为  $f_1, f_2, \dots, f_n$ 。

而由式(3)可知  $0, \Delta t, 2\Delta t, \dots, (n-1)\Delta t$  时刻的拟合函数值为  $y_1, y_2, \dots, y_n$ , 为使采样数据与函数拟合值之间误差的平方和

$$\varepsilon(a, b) = \sum_{i=1}^n [f_i - y_i]^2, \quad (4)$$

最小, 须满足条件  $\frac{\partial \varepsilon}{\partial a} = 0, \frac{\partial \varepsilon}{\partial b} = 0$ , 可得方程

$$\begin{cases} \sum_{i=1}^n [a \cos(100\pi t_i) + b \sin(100\pi t_i)] \cos(100\pi t_i) = \sum_{i=1}^n f_i \cos(100\pi t_i), \\ \sum_{i=1}^n [a \cos(100\pi t_i) + b \sin(100\pi t_i)] \sin(100\pi t_i) = \sum_{i=1}^n f_i \sin(100\pi t_i). \end{cases} \quad (5)$$

令

$$\begin{cases} Q_{11} = \sum_{i=1}^n \cos(100\pi t_i) \cos(100\pi t_i) \\ Q_{12} = \sum_{i=1}^n \sin(100\pi t_i) \cos(100\pi t_i) \\ Q_{21} = \sum_{i=1}^n \cos(100\pi t_i) \sin(100\pi t_i) \\ Q_{22} = \sum_{i=1}^n \sin(100\pi t_i) \sin(100\pi t_i) \end{cases}, \begin{cases} l_1 = \sum_{i=1}^n f_i \cos(100\pi t_i), \\ l_2 = \sum_{i=1}^n f_i \sin(100\pi t_i). \end{cases}$$

则式(5)可写成矩阵形式

$$Q \cdot d = l, \quad (6)$$

其中  $Q = \begin{bmatrix} Q_{11} & Q_{12} \\ Q_{21} & Q_{22} \end{bmatrix}$ ,  $l = \begin{bmatrix} l_1 \\ l_2 \end{bmatrix}$ ,  $d = \begin{bmatrix} a \\ b \end{bmatrix}$ , 从式(6)可求得  $a$ 、 $b$ , 得到  $A = \sqrt{a^2 + b^2}$ 。

### 2.2 采样频率与采样点数的选取

发生铁磁谐振或单相接地时,系统零序电压可表现为  $1/2$  分频、基频与倍频 3 种情况。当零序电压为基

频时,符合式(1)信号模型,其拟合幅值约等于实际幅值;当零序电压为分频或倍频时,则不符合式(1)信号模型,拟合幅值与实际幅值相差较大,其值与采样频率  $f$  及采样点数  $N$  有关。数据实验表明,当采样时间长度  $T(T=N/f)$  为 0.04 s 整数倍时,分频正弦函数的拟合幅值与实际值相比,约为 0,当  $T$  为 0.02 s 的整数倍时,倍频正弦函数的拟合幅值与实际值相比,也约为 0。因此,可取  $T$  为 0.04 s 的整数倍,利用 2.1 节的方法计算零序电压的拟合幅值判断其是否为基频量。综合考虑该算法的拟合效果与运算量,采样频率取 1 kHz,采样点数取 40。

### 2.3 拟合效果分析

为更好的研究正弦拟合法的特点,下面设计一组数据实验,在正弦信号频率、相位发生变化时考察算法的拟合效果。以固定幅值的正弦函数  $g(t)=100\sin(2\pi f_0 t+\theta)$  为待检测信号,利用正弦拟合法计算该函数的幅值,计算结果如表 1 所示。其中: $f_0$  为函数的频率, $\theta$  为函数的相位。

由表 1 可以看出,当函数的频率为 49.9~50.1 Hz 时,拟合得到函数幅值与原函数相比,误差很小,误差最大时其幅值为 99.895 6( $f_0=49.9$  Hz, $\theta=1.740 8+k\pi$ , $k$  为整数);当函数的频率为 24.2~24.6 Hz 时,拟合效果很差,拟合的函数幅值远小于原函数,其最大幅值为 4.185 1( $f_0=24.2$  Hz, $\theta=0.18+k\pi$ , $k$  为整数);当函数的频率为  $50n$  Hz 时,拟合的函数幅值均为 0。由以上结果可以看出,正弦拟合算法类似于带通滤波器,基频正弦函数的拟合效果很好,而分频与高频正弦函数基本上被滤掉。因此,可以根据拟合正弦函数的幅值判断采样数据是否为基频量。

表 1 正弦函数的拟合幅值

频率 $f_0$	相角 $\theta$ (弧度)	拟合幅值 $A$
50	任意值	100
49.9	0	100.093 4
50.1	$\pi/4$	99.968 4
24.2	$\pi/2$	2.113 4
24.6	$3\pi/4$	1.531 5
$50n(n=2,3,\dots)$	任意值	0

### 2.4 运算量分析

在正弦函数的拟合计算中,如果采样频率与采样点数是确定的, $Q$  就是确定的, $Q^{-1}$  也是确定的。因此在计算时,不需要计算  $Q$  中的各元素,只需计算  $l_1$ 、 $l_2$ 。如在上述运算过程中, $Q^{-1}=0.05E(E$  为  $2\times 2$  单位矩阵),在计算  $a$ 、 $b$  时,仅需 82 步乘法、78 步加法。

## 3 铁磁谐振与单相接地的辨识方法

根据电网发生铁磁谐振时零序电压频率的特点,可以将铁磁谐振划分为 2 种类型:一种是基频谐振;另一种是非基频谐振,其中包括分频谐振与倍频谐振。当系统零序电压越限时,首先对零序电压进行采样,并找出最大采样值  $f_{\max}$ ;再将采样数据拟合为频率 50 Hz 的正弦函数,得到其幅值  $A$ ,并计算  $\alpha=A/f_{\max}$ ;最后依据  $\alpha$  的值初步判断故障类型,即:当  $\alpha$  小于阈值  $K_1$  时,判定系统发生非基频谐振;当  $\alpha$  大于  $K_1$  时,则判定系统发生基频谐振或单相接地。

基频谐振是由 PT 非线性励磁特性引起的,系统发生基频谐振时,其零序电压并不是标准的正弦波,波形会发生畸变。然而,当系统发生单相接地故障时,大约经过 2~3 个周波,零序电压的暂态分量基本消失,其波形呈正弦量,因此可利用波形畸变与否区分基频谐振与单相接地。此时,以零序电压的拟合正弦函数作

为参照波形,与采样波形相比较,并以波形畸变度(见式(7))衡量采样波形与拟合正弦函数的相似程度,最终实现以波形畸变度辨识基频谐振与单相接地的目的。定义波形畸变度

$$\rho = \frac{\sum_{i=1}^n |y_i - f_i|}{A}, \quad (7)$$

式(7)中, $\rho$ 反映采样波形与标准正弦波的相似程度, $\rho$ 越小说明相似程度越高。当 $\rho$ 大于阈值 $K_2$ 时,判定系统发生基频谐振;反之,则判定系统发生单相接地。

综上所述,辨识方法的流程如图 2 所示。

## 4 仿真验证

### 4.1 建立仿真模型

为了验证该辨识方法的正确性与有效性,以 ATP-EMTP 软件为实验平台,按照图 1 搭建 10 kV 中性点不接地系统铁磁谐振的仿真模型。其中 PT 型号为 JDZJ-10,伏安特性(二次侧试验数据)如表 2 所示;输电线路采用分布参数模型,参数为: $R_1=0.348 \Omega/\text{km}$ , $X_1=0.336 \Omega/\text{km}$ , $C_1=0.01 \mu\text{F}/\text{km}$ ; $R_0=0.65 \Omega/\text{km}$ , $X_0=1.59 \Omega/\text{km}$ , $C_0=0.006 \mu\text{F}/\text{km}$ 。

表 2 电压互感器的励磁特性

电压/V	40	60	80	90	100	110
电流/mA	70	140	320	500	800	1 350

### 4.2 确定阈值 $K_1$ 、 $K_2$

铁磁谐振时的系统零序电压接近正弦波形,因此可参考正弦波形来选取阈值  $K_1$ 。由表 1 可以得出,当正弦波形的频率为基频时, $\alpha$  的值约为 1,而当其频率为分频或倍频时, $\alpha$  的值约为 0,因此,阈值  $K_1$  可取 0.5;系统发生单相接地时的零序电压呈正弦量,由计算可知当系统频率在 49.9~50.1 Hz 范围变化时,其波形畸变度不大于 0.17,而基频谐振时,零序电压波形发生畸变,通过对多组零序电压仿真波形进行计算可知,其波形畸变度不小于 2.2,因此,阈值  $K_2$  可取 1.0。

### 4.3 算法的仿真验证

图 3 中虚线为典型的铁磁谐振与单相接地的系统零序电压波形。其中:图 3(a)中虚线是当线路长度为 14.5 km, $t=0.073$  s 单相接地故障消除而引发的分频谐振零序电压;图 3(b)中虚线为当线路长度 5 km,由电源向带电压互感器的空载母线合闸时引发的基频谐振零序电压;图 3(c)中虚线是频率为 49.9 Hz 时系统发生单相接地故障时的零序电压。数据处理软件为 Matlab,采样数据均取自图 3 中 0.15~0.19 s 时间段的仿真波形,由正弦拟合法计算得到的此时间段的拟合波形如图 3 中实线所示,计算及故障判定结果如表 3。

表 3 计算及故障判定结果

故障类型	$\alpha$	畸变度 $\rho$	判定结果
分频谐振	0.060 6	—	非基频谐振
基频谐振	0.948 8	2.387 6	基频谐振
单相接地	1.001 1	0.162 0	单相接地

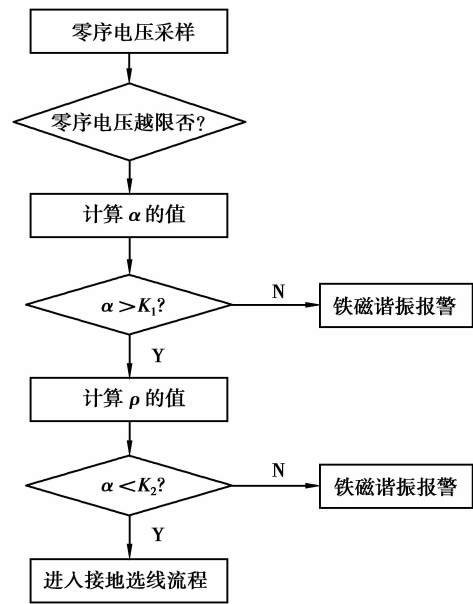


图 2 辨识流程图

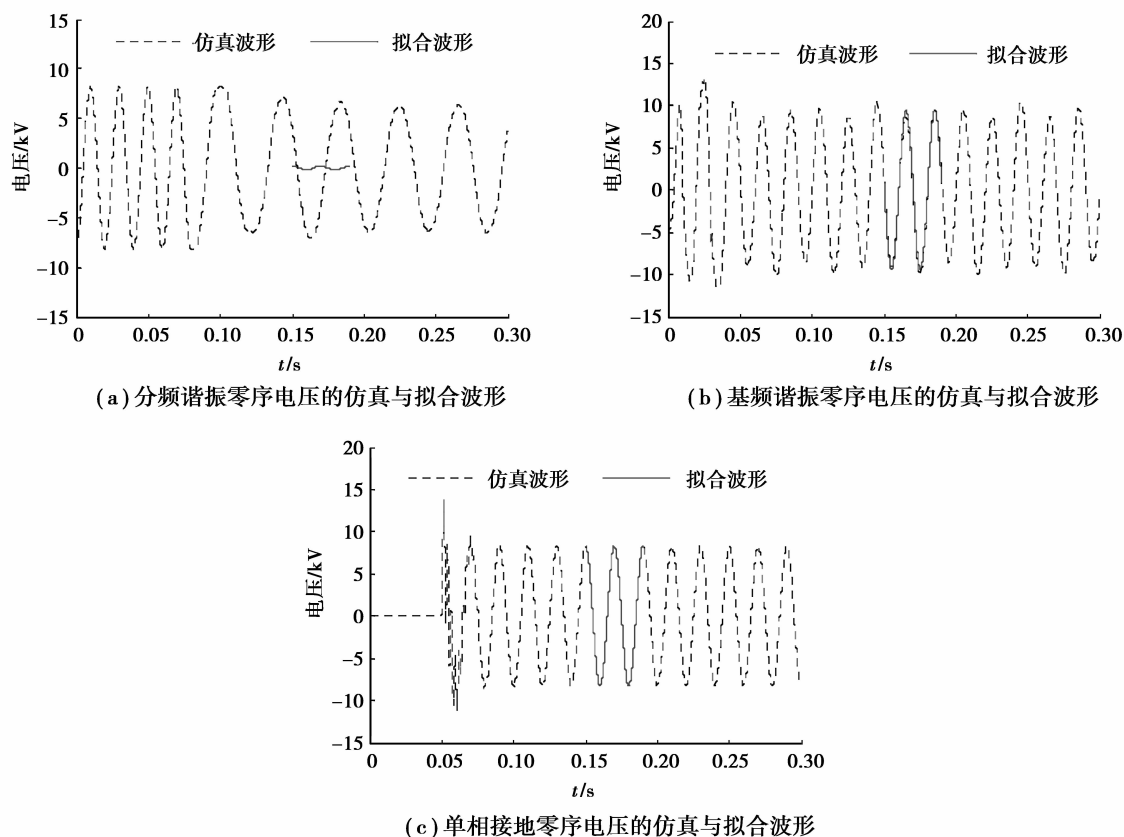


图 3 铁磁谐振/单相接地零序电压的仿真与拟合波形

由表 3 的计算结果可以看出,分频谐振时, $\alpha$  明显小于 0.5,可判定系统发生非基频谐振;基频谐振与单相接地时, $\alpha$  接近于 1,然而两者波形畸变度存在明显差距,基频谐振时计算得到的  $\rho$  明显大于 1.0,而单相接地的  $\rho$  值远小于 1.0。从上述分析中可知,正弦拟合算法有较高的灵敏性,能够有效辨识铁磁谐振与单相接地。

## 5 结 论

- 1) 利用正弦拟合算法对零序电压采样数据进行拟合,通过拟合函数的幅值可以判断零序电压是否为基频量。
- 2) 利用基频谐振时零序电压波形畸变的特点,构造波形畸变度函数,通过计算波形畸变度可有效区分基频谐振与单相接地。
- 3) 该辨识算法原理简单,运算量小,灵敏性高,对硬件要求不高,易于装置开发与工程实现。

### 参考文献:

- [1] Gong J, Zhou Y Q, Wang N, et al. Discussion of principles and traits of methods for a single-phase short circuit to ground feeder protection in ineffectively grounded power systems [C] // 2011 International Conference on Electronics and Optoelectronics. July 29-31, 2011, Dalian, China; IEEE Computer Society, 2011: 345-348.
- [2] Marti J R, Soudack A C. Ferroresonance in power system: fundamental solutions [J]. IEEE Proceedings- Generation Transmission and Distribution, 1991, 138(4): 321-329.
- [3] Yu H Y, Zhou H. Study on simulation of ferroresonance elimination in 10 kV power system [C] // 2005 IEEE/PES Transmission and Distribution Conference and Exhibition Asia and Pacific. August 15-18, 2007, Dalian, China; Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc, 2006: 1-7.
- [4] 鲁铁成, 陈维贤. 配电系统 PT 引起的铁磁谐振及抑制新方法 [J]. 高电压技术, 1998, 24(3): 13-16.  
LU Tiecheng, Chen Weixian. PT Resonance in distribution systems and a new suppression method [J]. High Voltage

- Engineering, 1998, 24(3): 13-16.
- [5] 王建勋, 吴启涛, 纪延超, 等. 新型小电流接地系统选线消谐装置的研制[J]. 继电器, 2001, 29(5): 34-36.  
WANG Jianze, WU Qitao, JI Yanchao, et al. A novel detector of ground fault and ferroresonance in ungrounded distribution system[J]. Relay, 2001, 29(5): 34-36.
- [6] 郝毅, 张艳霞. 基于小波包分频特性的中性点不接地系统铁磁谐振检测[J]. 电网技术, 2006, 30(23): 72-76.  
HAO Yi, ZHANG Yanxia. Detection of ferroresonance in neutral non-grounding system based on decomposition characteristic of wavelet packet[J]. Power System Technology, 2006, 30(23): 72-76.
- [7] 杨晓辉, 蔡旭. 分形理论在中压电网故障辨识中的应用[J]. 电力系统自动化, 2006, 30(4): 59-64.  
YANG Xiaohui, CAI Xu. Application of fractal theory in the fault classification for distribution systems[J]. Automation of Electric Power Systems, 2006, 30(4): 59-64.
- [8] 齐郑, 董迪, 杨以涵. 中性点不接地系统铁磁谐振与单相接地辨识技术[J]. 电力系统自动化, 2010, 34(1): 55-58.  
QI Zheng, DONG Di, YANG Yihan. Technique for differentiation between ferroresonance and single-phase earth fault in Isolated neutral point system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2010, 34(1): 55-58.
- [9] Peterson H A. Transients in power systems[M]. England: John Wiley & Sons, LTD, 1951.
- [10] Vahidi B, Abandansari A. Teaching ferroresonance in power system to undergraduate students by using Matlab-Simulink[J]. Computer Applications in Engineering Education, 2011, 19(2): 347-357.
- [11] Sutherland, Peter E, Manning, et al. Ferroresonance in a 13.8 kV distribution line [C] // 2006 IEEE Industry Applications Conference-Forty-First IAS Annual Meeting. Tampa, October 8-12, 2006, FL, United states. [S. l.]: Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc. 2006: 2238-2241.
- [12] Tsao T P, Ning C C. Ferroresonant overvoltage caused by a transformer interacting with underground cables [C] // IASTED International Conference on Energy and Power Systems, March 29-31, 2006, Chiang Mai, Thailand: Int. Assoc. of Science and Technology for Development, 2006: 1-5.
- [13] 许志龙, 黄建华, 王大忠. 10 kV 电网 TV 铁磁谐振过电压数字仿真及研究[J]. 电力自动化设备, 2001, 21(2): 27-30.  
XU Zhilong, HUANG Jianhua, WANG Dazhong. The digital simulation and study of TV ferroresonance over-voltage in 10 kV power network[J]. Electric Power Automation Equipment, 2001, 21(2): 27-30.
- [14] Zhu X K, Yang Y H, Lian H B, et al. Study on ferroresonance due to electromagnetic PT in ungrounded neutral system [C] // Proceedings of 2004 International Conference on Power System Technology, November 21-24, 2004, Singapore: Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc. 2004: 924-929.
- [15] Zhou L X, Yin Z D. Research on PT ferromagnetic resonance region and the controllable damping [C] // 2007 IEEE Lausanne Powertech. July 1-5, 2007, Lausanne, Switzerland: The Institute of Electrical and Electronics Engineers Power and Electronics Society, 2007: 413-418.
- [16] Giaquinato N, Trotta A. Fast and accurate ADC testing via an enhanced sine wave fitting algorithm[J]. IEEE transactions on Instrumentation and Measurement, 1997, 46(4): 1020-1025.
- [17] 李森. 基于 LabVIEW 电能质量测量系统设计[J]. 电子测量技术, 2008, 33(11): 58-62.  
LI Sen. Research on principle of PT resonance in distribution power system and its suppression [J]. Electronic Measurement Technology, 2007, 22(5): 58-62.

(编辑 侯 湘)