

基于状态变量法的新型防雷变压器暂态过电压分析

王巨丰 陆俊杰 陈宙平
(广西大学 电气工程学院 南宁 530004)

摘要:为了解决传统变压器易被雷击坏的问题,本文分析了雷电波的频谱特性,并介绍一种新型防雷变压器的设计方案及其防雷机理。采取的措施是在变压器绕组上加装一种转换装置,即在铁心外增加一组或两组串接电容的附加绕组。建立变压器绕组时域等值电路的状态方程,通过 MATLAB 软件中 Simulink 的状态方程模块进行仿真,给出变压器在雷电波作用下的暂态过程。暂态仿真结果表明新型防雷变压器的附加绕组能够大幅度降低雷电波作用于空载配电变压器的正、反变换过电压。

关键词:状态变量法;新型防雷变压器;频谱;暂态过电压

中图分类号:TM863

文献标识码:A

文章编号:1001-1390(2009)06-0021-05

Analysis of Transient Voltage in New Type of Lightning Proof Transformer Based on State-Variable Method

WANG Ju-feng, LU Jun-jie, CHEN Zhou-ping
(Electric Engineering College, Guangxi University, Nanning 530004, China)

Abstract: In order to solve the damageable problem for traditional transformer which is accessible to cause by lightning intrusive waves, the frequency spectrum of some lightning waves is analyzed and the design principle of a New Type Lightning-proof Transformer is proposed in this paper. One or two series connection of the additional winding capacitance is added to the core. The state-space equation of time domain equivalent circuit is established. In the role of lighting waveform, transient process of transformer is simulated by the state-space block of MATLAB. The results of simulation prove that the attached windings of New Type Lightning-proof Transformer have satisfactory effects on restraining the positive and reverse transformation of over voltage.

Key words: state-variable method; new type of lightning proof transformer; frequency spectrum; transient voltage

0 引言

变压器绝缘水平低,是电力系统中极易被雷击坏的设备。变压器的防雷手段主要是在高、低压侧同时安装避雷器,实施“三位一体”接地,但受到制造工艺水平的限制,它的通流容量和动作次数非常有限。实验测试表明,在极限条件下氧化锌避雷器正常动作次数只有两次。另外,氧化锌避雷器的“劣化度”高,导致工频泄漏电流增加快,甚至会引起工频短路。

变压器受雷击损坏,主要是由正、反变换过电压引起的。当二次侧落雷后,雷电波通过低压配电设备入侵到低压线圈,低压侧中性点接地,则按变压器变比在一次绕组中感应正变换过电压。该过电压幅值远远大于变压器绕组绝缘的耐压水平,极易引起变压器匝间绝缘击穿。当一次侧侵入雷电波时,高压避雷器

正常动作,雷电流在接地电阻上产生压降,通过低压线圈的中心点加到低压线圈上,通过变压器的电磁感应使一次侧出现反变换过电压^[1,2]。

1 雷电流的频谱分析

研究雷电过电压必须掌握雷电参数,电气设备的雷电冲击试验和防雷设计要求将雷电波波形等值为典型波形。常用的雷电流等值波形有双指数波、斜角波和半余弦波等几种。双指数波是与实际雷电流波形最接近的^[3-6],表达式为:

$$i(t) = kI_L(e^{-\alpha t} - e^{-\beta t}) \quad (1)$$

式中常数 k 、 α 、 β 由雷电流波形确定; I_L 为雷电流的峰值。对式(1)进行傅里叶变换得雷电流的振幅频谱函数:

$$I(\omega) = \left| \int_{-\infty}^{\infty} i(t) e^{-j\omega t} dt \right| = k I_L (\beta - \alpha) / \sqrt{(\alpha^2 + \omega^2)(\beta^2 + \omega^2)} \quad (2)$$

式中 ω 为角频率。取 $k I_L = 1$ 绘制不同参数下的雷电流振幅频谱图,如图 1 所示。

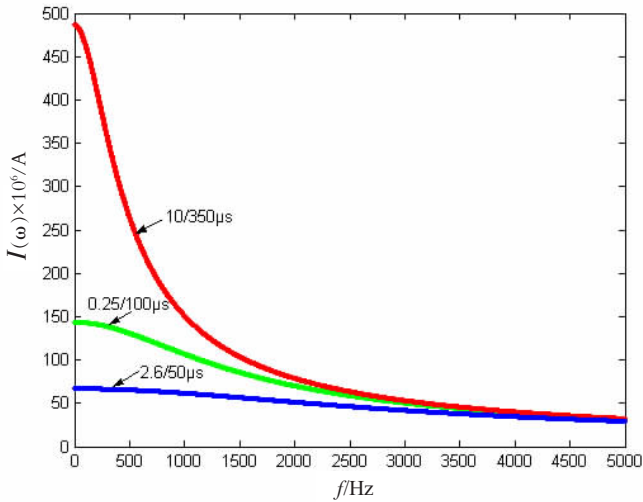


图 1 振幅频谱图

Fig.1 The wave of spectral amplitude

根据巴塞瓦公式^[4]可求出不同波形的雷电流在 $[0 \sim \omega]$ 区间的相对能量累积频谱函数:

$$W^*(\omega) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\omega} [I(\omega)]^2 d\omega / \left\{ \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} [I(\omega)]^2 d\omega \right\} \\ = \frac{2}{\pi} (\beta \arctan \frac{\omega}{\alpha} - \alpha \arctan \frac{\omega}{\beta}) / (\beta - \alpha) \quad (3)$$

相对能量累积频谱图如图 2 所示。由上述频谱图分析可知,雷电能量主要集中在 100Hz~10kHz,而雷电波的频谱中主要频率分量大体上集中在 0~100kHz,所以只要防止 1~10kHz 的雷电波,就能把雷电波的能量削减掉 90% 以上,由低通滤波器让雷电波进入大地。

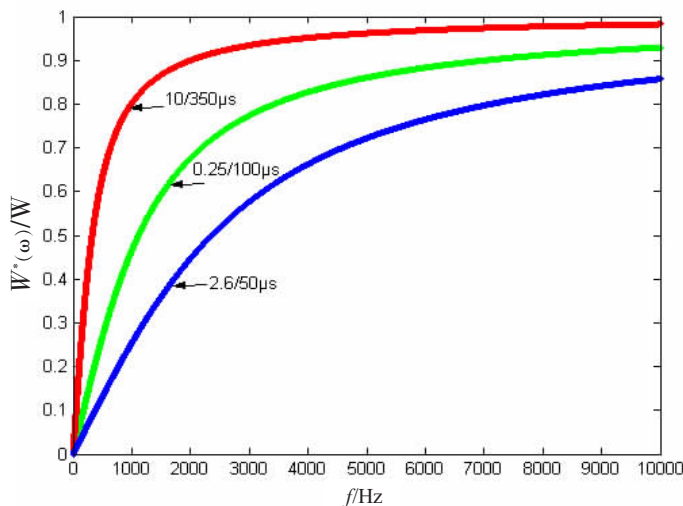


图 2 相对能量累积频谱图

Fig.2 The wave of relative energy spectral amplitude

2 新型防雷变压器模型

2.1 模型建立

如图 3 所示,在变压器绕组的铁心外增加一组或两组串接电容的附加绕组,将入侵雷电波在绕组端部产生的正反射波转变为负反射波,利用雷电波负反射波来抵消雷电入侵波,达到限制雷电过电压的目的^[7]。

本文分析的配电变压器电压等级为 10kV 以下,可忽略层间电容及对地电容,采用图 4 的时域等值电路计算变压器绕组的波过程。其中 U_s 为电源电压(即雷电电压), R_s 为雷电波阻(取 200Ω), R_1, R_2, R_3, R_4 分别为一次、二次、附加绕组的电阻, L_1, L_2, L_3, L_4 分别为一次、二次、附加绕组的自感, M_{12} (或 M_{21}), M_{13} (或 M_{31}), M_{14} (或 M_{41}) 分别为一次与二次、一次与附加绕组的互感, M_{23} (或 M_{32}), M_{24} (或 M_{42}) 为二次与附加绕组的互感, L_{2d} 为二次绕组负载的电感, C_1, C_2 为附加绕组的电容, R_{2d}, R_{3d}, R_{4d} 为附加绕组的外电阻, i_1, i_2, i_3, i_4 分别为一次、二次、附加绕组的电流, U_1, U_2, U_3, U_4 分别为一次、二次、附加绕组的

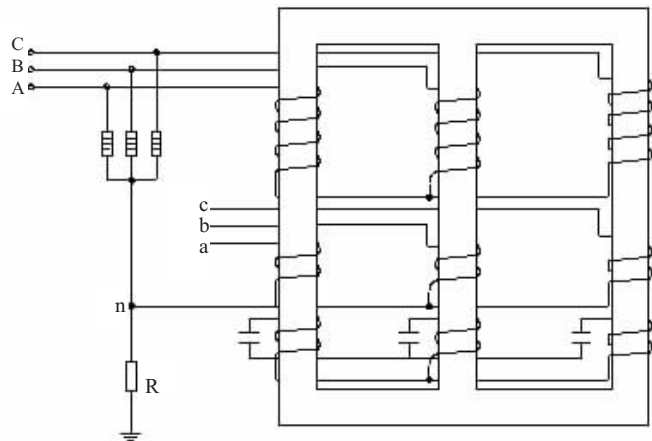


图 3 新型防雷变压器

Fig.3 New type of lightning proof transformer

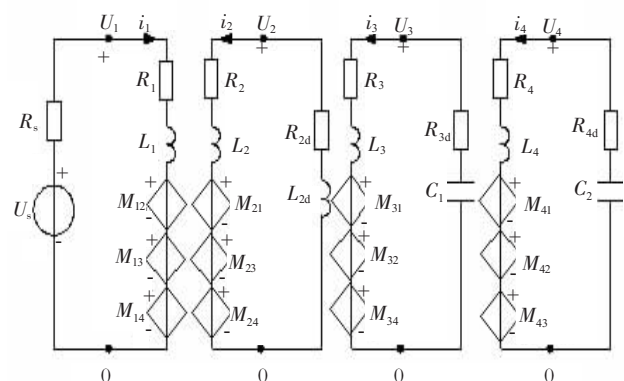


图 4 变压器的时域等值电路

Fig.4 Time domain equivalent circuit of transformer

电压 U_{C1} 、 U_{C2} 为外接电容电压。变压器时域等值电路的微分方程为^[2,8-9]：

$$\begin{cases} U_s = i_1 \cdot R_s + R_{11} i_1 + L_1 \frac{di_1}{dt} + M_{12} \frac{di_2}{dt} + M_{13} \frac{di_3}{dt} + M_{14} \frac{di_4}{dt} \\ 0 = R_2 \cdot i_2 + R_{2d} \cdot i_2 + L_2 \frac{di_2}{dt} + L_{2d} \frac{di_2}{dt} + M_{21} \frac{di_1}{dt} + M_{23} \frac{di_3}{dt} + M_{24} \frac{di_4}{dt} \\ 0 = R_3 \cdot i_3 + R_{3d} \cdot i_3 + L_3 \frac{di_3}{dt} + M_{31} \frac{di_1}{dt} + M_{32} \frac{di_2}{dt} + M_{34} \frac{di_4}{dt} + U_{C1} \\ 0 = R_4 \cdot i_4 + R_{4d} \cdot i_4 + L_4 \frac{di_4}{dt} + M_{41} \frac{di_1}{dt} + M_{42} \frac{di_2}{dt} + M_{43} \frac{di_3}{dt} + U_{C2} \\ i_3 = C_1 \frac{dU_{C1}}{dt} \\ i_4 = C_2 \frac{dU_{C2}}{dt} \end{cases} \quad (4)$$

2.2 状态变量法求解等值电路

将式 (4) 转换为状态空间表达式的矩阵微分方程：

$$\begin{cases} \frac{dX}{dt} = AX + BU_s \\ Y = CX + DU_s \end{cases} \quad (5)$$

$$X = [i_1; i_2; i_3; i_4; U_{C1}; U_{C2}]^T;$$

$$A = - \begin{bmatrix} L_1 & M_{12} & M_{13} & M_{14} & 0 & 0 \\ M_{21} & L_2 + L_{2d} & M_{23} & M_{24} & 0 & 0 \\ M_{31} & M_{32} & L_3 & M_{34} & 0 & 0 \\ M_{41} & M_{42} & M_{43} & L_4 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & C_1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & C_2 \end{bmatrix}^{-1}$$

$$\begin{bmatrix} R_1 + R_s & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & R_2 + R_{2d} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & R_3 + R_{3d} & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & R_4 + R_{4d} & 0 & 1 \\ 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$Y = [U_1; U_3; X];$$

输入矩阵 C 发生变化时，输出方程 Y 也会相应的发生变化。为了选择合适的观测变量，可对 C 进行修正。当初始时刻为 t_0 ，初始状态为 $X(t_0)$ ，状态方程的解为：

$$X(t) = e^{A(t-t_0)} X(t_0) + \int_{t_0}^t e^{A(t-\tau)} BU_s(\tau) d\tau \quad (6)$$

$$B = \begin{bmatrix} L_1 & M_{12} & M_{13} & M_{14} & 0 & 0 \\ M_{21} & L_2 + L_{2d} & M_{23} & M_{24} & 0 & 0 \\ M_{31} & M_{32} & L_3 & M_{34} & 0 & 0 \\ M_{41} & M_{42} & M_{43} & L_4 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & C_1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & C_2 \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix};$$

$$C = [-R_s, 0, 0, 0, 0, 0; 0, 0, -R_{3d}, -1, 0, 0; \text{eye}(6)];$$

$$D = [1; 0; \text{zeros}(6, 1)];$$

3 仿真分析

3.1 仿真模块

变压器型号为 ZS9-50/10，其绕组为多层连续式，容量 50kVA，电压 :10kV/0.4kV/0.1kV/0.1kV，连接组 :Y_{yn0} 0.4kV 与 10kV 线圈之间放置静电屏 (0.3mm 铜箔) 静电屏重叠口 30mm，重叠口之间放置绝缘。静电屏三相连接后通过套管引出油箱外，可用铜片接到接地螺栓接地。层间绝缘布置，一、二次绕组线圈均采用多层圆筒式，一次绕组线圈绕 14 层，不满匝放在第 13 层 63 匝，其余各层 149 匝。二次绕组线圈绕 4 层，每层 20 匝。一次绕组的电阻为 15.5Ω，二次绕组、附加绕组的电阻都为 0.2Ω。采用 MIKE 等人提出的空心电感模型计算得表 1 参数^[10]。

表 1 变压器各绕组的自感及互感 (mH)

Tab.1 Self inductance and mutual inductance of all coils of the transformer (mH)

	一次绕组	二次绕组	附加绕组 1	附加绕组 2
一次绕组	431.97	7.8553	4.1417	3.9971
二次绕组	7.8553	0.3337	0.0706	0.0682
附加绕组 1	4.1417	0.0706	0.0656	0.0631
附加绕组 2	3.9971	0.0682	0.0631	0.0729

仿真模块如图 5 所示，以单相雷电波入侵为例进行仿真。按半峰值波长长时间奇延拓展开，其基波周期分别为 100μs、40μs，取附加绕组 1 的谐振中心频率为 25kHz，附加绕组 2 的谐振中心频率为 10kHz。附加绕组 1 外接 4μF 电容，附加绕组 2 外接 1μF 电容。为使附加绕组不对工频电压构成影响，附加绕组 1 的频带取 10kHz 以上，附加绕组 2 的频带取 3kHz 以上，因此附加绕组 1 的品质因数为 2，附加绕组 2 的品质因数为 3，附加绕组 1 的回路应串接 8Ω 电阻，附加绕组 2 的回路应串接 1Ω 电阻。

3.2 正变换过电压

(1) 一次绕组空载 (用 2000kΩ 电阻作为负载模拟

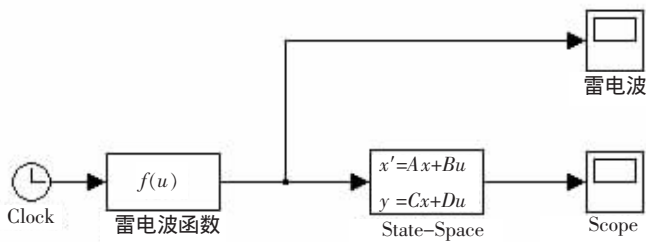


图 5 仿真模块

Fig.5 Simulation model

开路), 二次绕组施加单相 10kV 的 1.2/50μs 雷电电压波。仿真波形如图 6 所示。

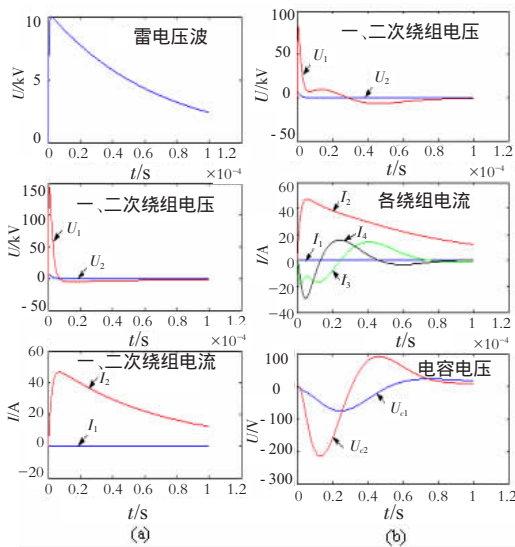


图 6 (a)附加绕组开路 (b)附加绕组串接电容

Fig.6 (a) Additional windings open

(b) Additional windings concatenating capacitance

(2) 一次绕组带额定负载(用 2kΩ 电阻作为负载模拟运行), 二次绕组施加单相 10kV 的 1.2/50μs 雷电电压波。仿真波形如图 7 所示。

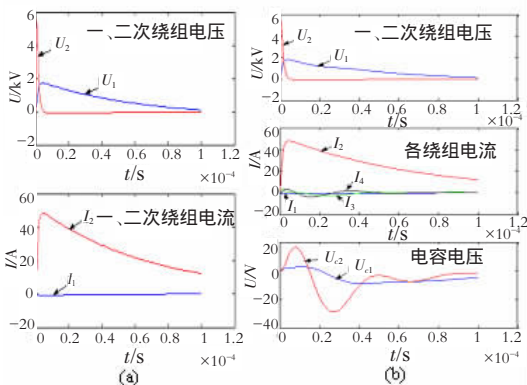


图 7 (a)附加绕组开路 (b)附加绕组串接电容

Fig.7 (a) Additional windings open

(b) Additional windings concatenating capacitance

3.3 反变换过电压

(1) 一次绕组空载(用 2000kΩ 电阻作为负载模拟开路), 二次绕组施加单相 750A 的 8/20μs 雷电流在 10Ω 接地电阻产生的电压波。仿真波形如图 8 所示。

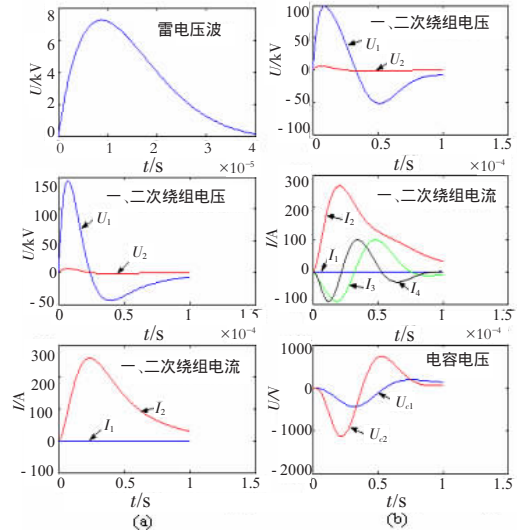


图 8 (a)附加绕组开路 (b)附加绕组串接电容

Fig.8 (a) Additional windings open

(b) Additional windings concatenating capacitance

(2) 一次绕组带额定负载(用 2kΩ 电阻作为负载模拟运行), 二次绕组施加单相 750A 的 8/20μs 雷电流在 10Ω 接地电阻产生的电压波。仿真波形如图 9 所示。

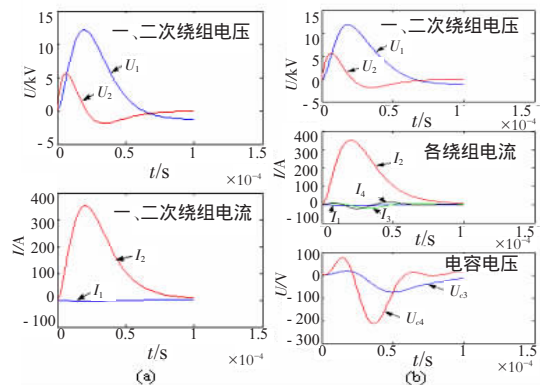


图 9 (a)附加绕组开路 (b)附加绕组串接电容

Fig.9 (a) Additional windings open

(b) Additional windings concatenating capacitance

4 结论

(1) 配电变压器空载时的正、反变换过电压严重威胁绕组绝缘。附加绕组接上电容后对空载变压器的正、反变换过电压有一定的降低作用。

(2) 附加绕组接上电容后对带额定负载变压器的正、反变换过电压影响不明显。但对同样幅值的雷电波,带额定负载的变压器的正、反变换过电压比空载

时的正、反变换过电压小得多。

(3)这种新型防雷变压器主要有铁芯、线圈、滤波网络和屏蔽层等部分,扼流线圈两端与滤波网络两端并联,滤波网络一端接地,初级线圈与次级线圈之间有屏蔽层。通过对雷电波的全负反射消除雷电波的入侵,解决了避雷器短路所引起的故障。

参考文献

- [1] 解广润.电力系统过电压[M].北京:水利电力出版社,1985.
- [2] 田树军.高效防雷变压器暂态过程的仿真[D].南宁:广西大学,2004.
- [3] Guido Ala, Maria Luisa, Di Silvestre. A simulation model for electromagnetic transients in lightning protection systems [J]. IEEE transactions on electromagnetic compatibility, 2002, 44(4): 539-554.
- [4] 罗仕乾.雷电波的频谱及能量分析[J].高电压技术, 1995, 21(1): 85-86.
- [5] Luo Shiqian. The spectrum and distribution of lightning wave [J]. High Voltage Engineering, 1995, 21(1): 85-86.
- [6] 丁美新, 李慧峰, 朱子述, 等.雷电流波形的数学模型及频谱仿真[J].高电压技术, 2002, 28(6): 8-10.
- [7] Ding Meixin, Li Huifeng, Zhu Zishu et al. The mathematical model and frequency spectrum simulation of lightning current [J]. High Voltage Engineering, 2002, 28(6): 8-10.
- [8] 董万胜, 刘欣生, 张义军, 等. 25-100MHz 频段闪电脉冲辐射能量频谱特征[J].中国电机工程学报, 2003, 23(3): 104-107.

Dong Wansheng, Liu Xinsheng, Zhang Yijun et al. Lightning electromagnetic radiation field spectra in the interval from 25 to 100 MHz [J]. Proceedings of the CSEE, 2003, 23(3): 104-107.

[7] 王巨丰. 高效防雷变压器[P]. 中国专利: ZL 01.276628.3, 2002-11-27.

[8] 王雪, 王增平. 变压器内部故障仿真模型的设计 [J]. 电网技术, 2004, 28(12): 50-52.

Wang Xue, Wang Zengping. Study of simulation of transformer with internal faults [J]. Power System Technology, 2004, 28(12): 50-52.

[9] 陈香辉, 王赞基. 电力变压器冲击试验故障定位的频域仿真方法[J]. 变压器, 2000, 37(8): 27-32.

Chen Xianghui, Wang Zanji. A novel simulation method in frequency domain for locating faults in power transformer windings under impulse voltage test [J]. Transformer, 2000, 37(8): 27-32.

[10] 卡兰塔洛夫, 采伊特林(苏). 电感计算手册[M]. 北京: 机械工业出版社, 1992.

作者简介:

王巨丰(1956-) 男, 工学博士, 教授, 从事现代防雷技术的研究。

Email: wangjufeng56@163.com

陆俊杰(1983-), 男, 硕士研究生, 从事区域电力系统的运行研究。

Email: ahjun291@163.com

陈宙平(1983-) 男, 硕士研究生, 从事现代防雷技术的研究。

收稿日期: 2008-12-04

(田春雨 编发)

(上接第 12 页)

点, 又具有分析精度高的优点, 所以可提高基波和谐波功率测量实时性, 具有重要的实际应用价值。

参考文献

- [1] Weon-Ki Yoon, Michael J. Devaney. Power Measurement Using the Wavelet Transform [J]. IEEE Transactions on Instrumentation Measurement, 1998, 47(5): 1205-1210.
- [2] E.Y. Hamid and Z. Kawasaki. Wavelet packet transform for rms values and power measurements [J]. IEEE Power Engineering Review, 2001, 21(9): 49-51.
- [3] A. Domijan, A. Hari and T. Lin. On the selection of appropriate filter bank for power quality monitoring [J]. IASTED International Conference Power Con, New York, USA, 2003, 10(12): 17-21.
- [4] Julio Barros and Ramón I. Diego. Analysis of Harmonics in Power Systems Using the Wavelet Packet Transform [J]. IEEE Instrumentation and Measurement Technology Conference. 2002, 5(1): 1484-1488.
- [5] 扬力华等译. 信号处理的小波导引[M]. 北京: 机械工业出版社, 2002.
- [6] Vaidyanathan P. P. Multi-rate Systems and Filter Banks [M]. New

Jersey: Prentice Hall, Englewood Cliffs, 1993.

[7] R. Ansari. Elliptic design for a class of generalized half-band filter [J]. IEEE Transactions on Acoustics, Speech and Signal Processing, 1985, 10(4): 1146-1150.

[8] 郭云, 刘鹏程等. 一类椭圆数字滤波器的全新设计方法 [J]. 电子测量与仪器学报, 1995, 9(2): 9-14.

[9] 胡昌华等. 基于 MATLAB 的系统分析与设计——小波分析 [M]. 西安: 西安电子科技大学出版社, 2004.

作者简介:

海瑛(1965-) 女, 汉族, 宁夏中宁人, 硕士, 副教授, 研究方向为信号分析及处理, 电气测量, 变压器的状态监测等。

Email: haiying@mail.zjxu.edu.cn

陈敬虞(1964-) 男, 汉族, 博士, 副教授, 研究方向为有限元分析理论与应用, 小波分析及应用等。

钱苏翔(1963-) 男, 汉族, 硕士, 教授, 研究方向为机电设备及变压器的状态监测与故障诊断技术。

收稿日期: 2009-01-06

(常会敏 编发)