

# 高压电力线路相位无线检测仪的设计\*

张金波<sup>1,2</sup>, 王宏华<sup>2</sup>, 胡 钢<sup>1</sup>, 王 庭<sup>3</sup>

(1. 河海大学计算机及信息工程学院, 常州 213022; 2. 河海大学电气工程学院, 南京 210098;  
3. 常州顺创电气科技有限公司, 常州 213001)

**摘 要:** 为了检测高压电力线路不同相间的电压相位差, 设计了一种根据法拉第电磁感应定律利用限幅电路实现电力线路电压相位信号采集的新检测仪, 该检测仪由两个发送装置和一个接收装置组成, 发送装置将采集的电压相位信号通过 ASK 调制电路调制后发送到接收装置, 接收装置将接收到的两路电压相位信号解调后分别送到 FPGA, 从而实现高压电力线路不同相间电压的相位差和相序的采集。实践证明, 该方法使高压电力线路电压的相位差和相序的检测更为方便、安全。

**关键词:** 高压电力线路; 电压相位差; 检测; 数字调制; 无线

中图分类号: TM930.9 文献标识码: A 文章编号: 1003-6520(2006)08-0108-03

## Design of Wireless Phase Detector for High Voltage Transmission Lines

ZHANG Jinbo<sup>1,2</sup>, WANG Honghua<sup>2</sup>, HU Gang<sup>1</sup>, WANG Ting<sup>3</sup>

(1. Computer & Information Engineering College, Hhai University, Changzhou 213022, China;  
2. College of Electrcal Engineering, Hhai University, Nanjing 210098, China;  
3. Shun-chuang Corporation of Electric Technology, Changzhou 213001, China)

**Abstract:** In order to detect the phase difference of high voltage transmission lines, this paper presents a new method for wireless detection of high voltage phase based on the law of electromagnetic induction. Using the new method, a wireless phase detector is designed and consists of two transmit devices and a receive device. In the transmit devices the phase signals of high voltage transmission lines are collected by electromagnetic coupling circuit and cut-ridge circuit. Then the phase signals are modulated by ASK modulate circuit and sent to the receive device in different frequencies. The receive device is portable and equipped with LCD. In the receive device, the phase signals of high voltage from the transmit devices are demodulated and sent to FPGA circuit. In the FPGA circuit the collection of phase difference and phase sequence for high voltage transmission lines is achieved. Then the measurement results are sent to the display circuit. The value of phase difference and wave graph of phase sequence can be directly displayed in the LCD. At the same time, the transmit devices can generate power frequency voltage signals which can be controlled by hand buttons. The power frequency voltage signals are mainly used to simulate the voltage signals of electric power lines when the detector is self inspecting. Only after successful self inspection which indicates the normal communication between the transmit devices and the receive device, the detector can measure the phases accurately. In the design of the detector, the disturbance of magnetic field can be successfully avoided through several kinds of measures such as electromagnetic screen, the adjustment of coupling capacitance, the reduction of ground circumfluent areas and high frequency transmission to avoid the high noise voltage. This method can result in reliable, convenient and secure detection of phase difference and phase sequence for high voltage transmission lines.

**Key words:** high voltage transmission lines; voltage phase difference; detection; digital modulate; wireless

## 0 引 言

目前, 国外已开发出无线核相装置并已投入市场。传送相位信息采用无线方式可使装置轻便、易用, 无线传输时能使操作人员长距离远离高压线, 大大提高了相位检测的安全系数, 有效保护了操作人员的人身安全。本文设计的一种高压电力线路相位无线检测仪由两发送装置和一个接收装置组成, 可

检测被测线路间相位大小和相序关系。该项技术可推广应用到金属氧化物避雷器阻性泄漏电流无线检测上, 对高压电力线路相位的无线检测方法的研究具有重要的实际应用价值<sup>[1-3]</sup>。

## 1 相位采集的原理

高压电力线路电压很高, 其周围场强也很高, 相位无线检测仪工作时, 将发送装置的电极与高压单

\* 常州市科技攻关资助项目(CE20040431); 中华人民共和国专利项目(专利号 0520110018 3); 河海大学常州校区科技创新基金资助项目(04B002-02)

相线路接触, 根据电磁场理论在电极上可耦合出具有相应相位的工频电磁信号, 该信号在电极电感线圈上感应出相应电动势  $E_i$ 。当高压电力线路距离为  $D$  时, 根据“毕奥-萨伐尔定律”计算出此时电极所处位置的磁感应强度  $B = \mu_0 i / 2\pi D$ 。由于  $E_i$  与穿过电感线圈的磁通量的变化率  $d\Phi/dt$  成正比即  $E_i = -d\Phi/dt$ , 式中“-”号确定了  $E_i$  方向。由于  $\Phi = BS = \mu_0 N i \pi r_1^2 / 2\pi D$ , 其中,  $N$  为串联电感线圈的匝数;  $\mu_0$  为真空磁导率;  $r_1$  为电感线圈的半径; 高压线的工频电流信号  $i = I \cos(\omega t + \varphi)$ 。由此得:

$$E_i = \mu_0 N \pi r_1^2 \omega I \sin(\omega t + \varphi) / 2\pi D。$$

可见,  $E_i$  的大小与  $i$ 、 $r_1$ 、 $N$ 、 $D$  等有关, 其相位与  $i$  相差  $\pi^{[4]}$ 。 $E_i$  通过限幅稳压, 再经低通滤波电路处理得到此高压相的相位信号, 原高压相的电压和电流信号均为峰值很高的正弦信号, 通过相对较低电压限幅得到近似的标准方波信号, 见图 1。

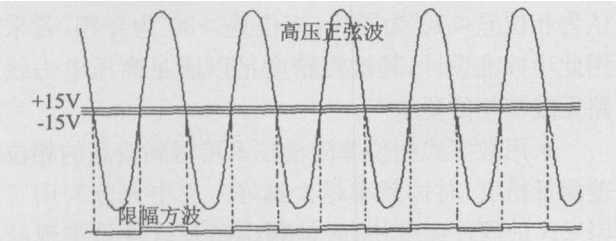


图 1 高压正弦信号与限幅波关系示意图  
Fig 1 Sketch map for relation of high voltage sine wave and limiter wave

2 无线数据传输方法

通过上述方法采集到的方波信号送到发送模块, 发送模块的载频信号由声表面谐振器产生, 频率可达数百 MHz, 该信号与采集的相位信号进行 ASK 调制。调制电路见图 2, 其中  $C_1$ 、 $C_2$ 、 $L_1$  构成考毕兹振荡器, 其振荡频率为

$$f = 1/2\pi \sqrt{L_1 C_1 C_2 / (C_1 + C_2)}。$$

当然,  $f$  须接近谐振器的固有频率, 信号从数据端输入, 信号为高电平时, 振荡电路工作, 输出端输出; 信号为低电平时, 电路停止工作。这样实现了信号的 ASK 调制, 调制信号再送入发送芯片, 达到无线传输目的<sup>[5,6]</sup>。

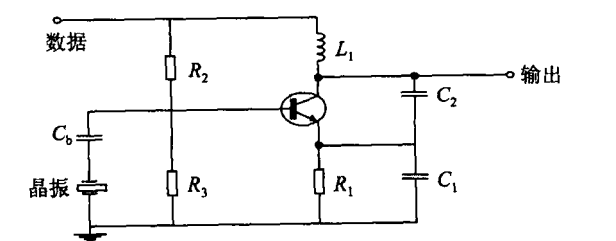


图 2 考毕兹振荡电路  
Fig 2 Colpitts oscillating circuit

3 高压电力线路相位无线检测仪的设计

高压电力线路相位无线检测仪主要包括 2 个发送装置和 1 个接收装置。

3.1 发送装置

发送装置主要采集高压相相位信号, 得到方波信号, 并把它调制后发送。基本结构见图 3。

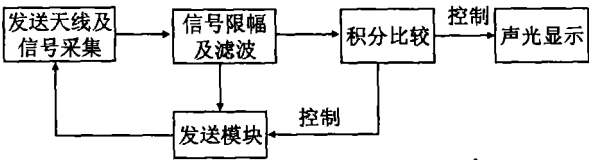


图 3 发送装置基本结构框图  
Fig 3 Block diagram for transmit device

高压电力线路相位无线检测仪正常工作时, 将发送装置的电极与高压线路接触, 在电极上可耦合出相应的电磁信号, 该信号在电极电感线圈上感应出相应电动势。通过限幅、滤波等处理, 取出该信号再分 2 路: 其中一路送至积分比较电路来控制声光显示电路进行声光显示, 让操作员知道装置已正常工作; 另一路送至发送模块进行 ASK 调制, 经发送模块将调制后的信号又送回至电极发送, 此时电极相当于发送天线。发送装置通过积分比较电路的输出信号来控制声光电路, 发出正常工作时的声光指示信号; 积分比较电路的输出信号同时控制发送模块工作, 发送模块将相位信号数据进行 ASK 调制后发送出去, 工作频率分别为 315 和 433 MHz。

3.2 接收装置

接收装置主要完成相位检测、结果显示等工作, 其基本结构见图 4。接收模块 1、2 分别负责对应的两个发送装置所送出的两路不同频率的 ASK 信号的接收, 并对所接收到的 ASK 信号解调, 恢复出原来的被调制信号。解调后的信号一路送到正负相位检测电路检测初步的正负相位, 另一路则送至现场可编程逻辑门阵列 FPGA 实现相位检测, 并将结果送至液晶模块显示。其工作频率与发送装置等同。

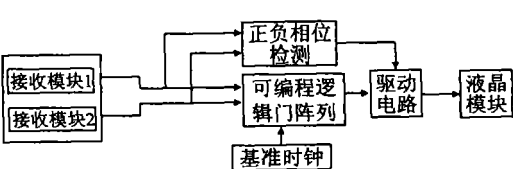


图 4 接收装置基本结构框图  
Fig 4 Block diagram for receive device

目前测量相位的方法可分为模拟和数字方法 2 类: 前者是先对多个相位差脉冲信号积分, 然后计算出多个相位差脉冲的宽度, 再取平均值求相位, 此方法精度较高, 但电路复杂, 且对元器件要求很高。后

者是直接用计数脉冲对相位差脉冲信号计数, 然后计算计数脉冲个数, 再取平均值求相位, 计数脉冲频率越高, 测量精度越高。本设计采用数字方法, 利用 FPGA 实现相位检测。FPGA 的工作频率较高, 能获得较精确的测量结果。相位检测的具体方法有多种, 此采用的是较为常用的过零检测法。此法通过计算 2 个或多个同频信号过零时间差, 再将时间差转换为相位差, 其原理见图 5。

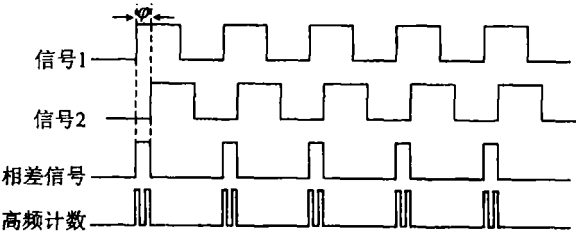


图 5 相位检测原理图

Fig 5 Principle diagram for detection of phase

相位差信号是一脉冲信号, 只要测出脉冲信号的占空比就可算出信号的平均值得出相位差, 占空比的测量类似于频率的测量, 只需测出脉冲信号的高电平宽度即可。

电路使用相差信号控制 FPGA 的计数, 当相差为高电平时, 计数器开始计数, 否则停止计数。假设 FPGA 基准时钟频率为  $f_s$ , 信号频率为  $f$ , 信号周期  $T = 1/f$ , 相位差信号脉冲宽度为  $\tau$ , FPGA 计数脉冲个数  $N = T/(1/f_s)$ ,  $T = N/f_s$ ; 如  $N\tau = \tau/(1/f_s)$ , 则  $\tau = N\tau/f_s$ 。相角  $\varphi = N\tau \times 360^\circ/N$ , 可见,  $\varphi$  取决于 FPGA 的计数脉冲个数  $N\tau$  及  $N$ , 当确定  $f$  及  $f_s$  时  $N$  确定。因  $N\tau = \tau f_s$ ,  $f_s$  较高时,  $N\tau$  较多, 故采样点数  $\tau$  较多, 保证了测量精度, 具体设计见图 6。

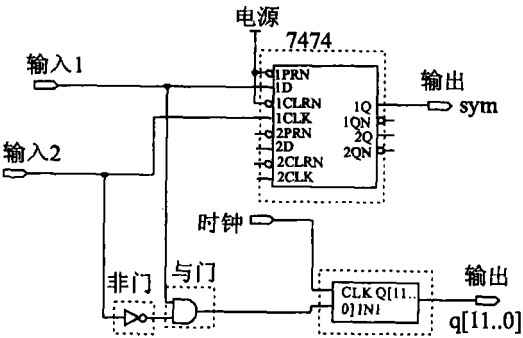


图 6 FPGA 相位和相序检测设计原理图

Fig 6 Principle diagram for FPGA in the detection of phase and phase sequence

在 Altera 公司的 FPGA 开发平台 Max+ plus 10.2 环境中, 有一 D 触发器(7474)实现正负相位检测(sym 信号表示), 设计的 PHASED 模块(由具体程序实现)由被测信号输入 1, 2 得到 IN1 信号控制, CLK 以 25MHz 作为计数脉冲, 每次计数完后经

FPGA 内部的乘除运算处理得到相位差数据的二进制表示形式(扩大 10 倍后)从  $q[11..0]$  输出。最后将 FPGA 的输出结果在 LCD 中显示两相位信号的超前、滞后关系和具体的相位差值<sup>[7,8]</sup>。

4 高压电力线路相位无线检测仪的试验

该检测仪已在实验室试验, 试验时采用调压器调整输入电压, 利用高压试验变压器升压, 使高压试验变压器的输出电压在 6~35 kV 范围变化, 同相试验时, 两个发送装置同时与一个高压试验变压器输出端接触, 异相试验时两个发送装置分别与两个高压试验变压器输出端接触, 检测结果显示两个相位差的检测误差  $< 1^\circ$ 。由于目前国内电力线路核相时无统一标准, 通常(国外产品)在电力线路核相时认为相位差  $< 10^\circ$  为同相, 相位差  $> 30^\circ$  为异相, 若采用此项标准设计, 其检测精度足以满足高压电力线路无线核相的要求<sup>[9]</sup>。

采用数字式相位差测量技术可得到较高的相位差测量精度, 时钟频率越大越好。文中充分利用了 FPGA 的硬件速度快、时钟频率高及软件易实现的优点, 使测量精度大大提高<sup>[10]</sup>。

5 结 语

新型的高压电力线路相位无线检测仪在设计硬件电路时采用了屏蔽金属外壳与电路板地相连、数字地和模拟地严格的一点共地、加去耦电容、减小地环流面积及选择较高频率发射避开了高压电晕噪声电平, 解决了强磁场电磁干扰问题。根据大量测量结果统计的输电线路电晕放电的频谱特性在 0.15~4 MHz 间, 一般无线电噪声的频谱特性不受季节、时间、气候等影响。研究表明, 在  $>$  数 MHz 的频率点, 电晕噪声电平显著降低, 输电线路电晕对无线电的干扰(主要对无线电接收机的中波段内的干扰), 一般情况下很小<sup>[11-16]</sup>。

该无线检测仪可较为方便地对高压电力线路进行相位核对和相序检测, 大大提高了操作人员在工作时的安全系数。实际检测中, 由于采用电磁耦合方式采集电压相位信号, 所以对导线有绝缘层的情况同样可检测。发送和接收装置均采用 1 节 9V 碱性电池供电, 其通信距离 10~30 m, 但为了保证在通信中不对其它设备产生影响, 设计时限制了其通信距离  $> 50$  m。此项技术须深入研究, 并具有很好的应用前景。

(下转第 121 页)

压较高,层间的电缆纸若受潮将成为绝缘的弱点,绝缘强度如果不能恢复,将使匝间和层间绝缘击穿。故应考虑二次线圈的匝间和一次线圈的层间绝缘—油浸电缆纸的介损,但因绕组的阻抗和感抗很小,很难测试出介损。

4 电磁单元介损测试时注意事项

根据预防性试验规程的要求,CVT 中压变压器介损的测试标准参照电磁式电压互感器(电压等级为 35 kV 及以下)的绕组绝缘标准值执行,但标准未注明测量试点及电压,故针对电磁单元的介损测试提出以下注意事项:

介损测试时,测量耐电压等级高比低的地方的介损意义大,故测量重点应放在一、二次线圈间。

某些电容器油、变压器油、SF<sub>6</sub> 介质是强电负性,低电压时偶极子偏转时间较长,被介损仪器误测为绝缘损耗;而高电压时偶极子偏转时间短,不影响介损测试。故测试时应尽量用较高电压,但不能超过设备的耐电压水平,以免损坏设备。

整体无法分拆测试时,要注意被测点的并联支路(包括通过杂散电容并联)和接线面板的影响。

同样的产品,某些部件可能因为满足生产厂家执行的标准要求而不太考虑装配位置的公差配合要求,在一定范围内影响到介损的测试结果,造成同一批产品的测试结果不同。

不同型号的产品,本来装配位置就不一致,更

有可能造成介损测试结果分散。

5 结 论

a) CVT 电磁单元的介损测试重要性不能与电容器、电磁式 TV 相提并论。

b) 电磁单元的介损测试更多地反映出各带电部件与油箱壳的杂散电容的介损;而测试两个二次绕组之间的介损,则反映油箱内的油及其他绝缘材料是否受潮或劣化。

c) 测试点不同对电磁单元介损测试影响不大。

d) 接线面板的绝缘电阻对电磁单元的介损测试影响很大。

参 考 文 献

[ 1 ] DL/T 596-1996, 电力设备预防性试验规程[S]. 北京: 中国电力出版社, 1992.  
[ 2 ] GB/T 4703-2001, 电容式电压互感器[S]. 北京: 中国电力出版社, 2005.  
[ 3 ] 张仁豫, 陈昌渔, 王昌长. 高电压试验技术[M]. 北京: 清华大学出版社, 2003.  
[ 4 ] DL474. 3-1992, 现场绝缘试验实施导则—介损损耗因数  $\tan \delta$  试验[S]. 北京: 中国电力出版社, 1992.  
[ 5 ] 凌子恕. 高压互感器技术手册[M]. 北京: 中国电力出版社, 2005.  
[ 6 ] 赵智大. 高电压技术[M]. 北京: 中国电力出版社, 2001.

梁子孟 1972—,男,工程师,从事电气设备的安装及检修工作。电话:(0595) 86372323; E-mail: 0204@na95598.com  
谭彦民 1974—,男,工程师,从事电力电容器的研究工作。  
收稿日期 2005-07-22 编辑 严 梦

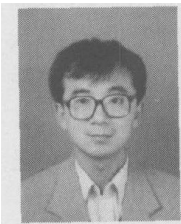
(上接第 110 页)

参 考 文 献

[ 1 ] 张金波, 胡 钢, 张学武, 等. 一种实用新型的高压无线核相装置的设计[J]. 计算机测量与控制, 2005, 13(1): 45-46.  
[ 2 ] 欧阳青. 输变电工程投运现场核相试验方法[J]. 电力安全技术, 2002, 13(2): 21-23.  
[ 3 ] 陈本礼. 厂用电源系统 6 kV 母线的核相[J]. 湖北电力, 1999, 26(4): 56-57.  
[ 4 ] 谢处方, 饶克谨. 电磁场与电磁波[M]. 3 版. 北京: 高等教育出版社, 1999.  
[ 5 ] 王兴亮. 数字通信原理与技术[M]. 2 版. 西安: 西安电子科技大学出版社, 2000.  
[ 6 ] 黄智伟. 射频集成电路芯片原理与应用电路设计[M]. 北京: 电子工业出版社, 2004.  
[ 7 ] 熊万安. 采用现场可编程逻辑门阵列(FPGA)技术的设计方法[J]. 通信技术, 1997, 16(1): 39-44.  
[ 8 ] 沈绪榜, 高德远. FPGA 的 VHDL 设计策略[J]. 小型微型计算机系统, 2003, 24(7): 1194-1196.  
[ 9 ] 张仁豫, 陈昌渔, 王昌长. 高电压试验技术[M]. 2 版. 北京: 清华大学出版社, 2003.  
[ 10 ] 李 辉. 快速滤波算法用于在线监测数据预处理[J]. 高电压技术, 2002,

28(7): 30-32.

[ 11 ] 王守礼. 高压输电线路的环境保护[J]. 云南电力技术, 2004, 32(2): 11-14.  
[ 12 ] 林晓宇, 陈仕修, 张晓敏. 高压输电线路电晕放电电磁辐射影响分析[J]. 电力环境保护, 2004, 20(3): 60-62.  
[ 13 ] 谢书勇, 王 韵. 高压输电导线电晕特性探讨[J]. 高压电器, 1996, 32(5): 21-23.  
[ 14 ] 唐 炬, 朱 伟, 孙才新, 等. GIS 局部放电的超高频检测[J]. 高电压技术, 2003, 29(12): 24-25.  
[ 15 ] 吉 峰. 混合信号电路板抗干扰能力和电磁兼容性[J]. 制导与引信, 2003, 24(3): 42-45.  
[ 16 ] 徐 华, 文习山, 舒 翔, 等. 特高压输电对环境的影响[J]. 湖北电力, 2004, 28(4): 52-53.



张金波

张金波 1967—,男,博士生,副教授,从事电力系统及其自动化和电能质量检测等研究。电话:(0519) 5192017; E-mail: zhangjb@hhuc.edu.cn  
王宏华 1963—,男,教授,博导,从事电力电子与电力传动和控制理论与控制工程等研究。  
胡 钢 1958—,男,教授,从事电力电子与电力传动及微机测控等方面的研究。

收稿日期 2005-07-10 编辑 蔡爱姣