

# 高压电力线路相位无线检测方法的研究与实现<sup>\*</sup>

张金波<sup>1,2</sup> 王宏华<sup>2</sup> 李开霞<sup>1</sup> 胡 钢<sup>1</sup>

<sup>1</sup>(河海大学计算机及信息工程学院 常州 213022)

<sup>2</sup>(河海大学电气工程学院 南京 210098)

**摘要** 本文提出一种高压电力线路相位无线检测的新方法,该方法由 2 个发送装置和 1 个接收装置组成,发送装置主要利用电磁耦合和限幅电路采集电网电压信号,将采集到的电网电压信号进行 ASK 调制发送到接收装置,接收装置将接收到的来自 2 个发送装置的电压信号进行解调,解调后恢复原来相位信号进行实时比较得到相位脉冲信号,从而间接地实现了对被测线路不同相之间的相位进行检测,发送模块采用高频发送来解决强磁场干扰问题,利用该技术已成功地开发了高压电力线路无线核相仪,该装置可以方便地对电网并网合闸进行检测。

**关键词** 高压 电力线路 相位 无线检测

**中图分类号** TM835.1 TM154.1 **文献标识码** A **国家标准学科分类代码** 470.4034 470.4014

## Study and realization of wireless phase measurement for high voltage electric power line

Zhang Jinbo<sup>1,2</sup> Wang Honghua<sup>2</sup> Li Kaixia<sup>1</sup> Hu Gang<sup>1</sup>

<sup>1</sup>(Computer & Information Engineering College, Hohai University, Changzhou 213022, China)

<sup>2</sup>(College of Electrical Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China)

**Abstract** A new method of wireless phase measurement for high voltage electric power line is introduced. The method includes transmitting and receiving devices. The voltage signal of the power line is acquired using the electromagnetic coupling and clipping circuits in the transmitting device. Then, the acquired voltage signals are ASK modulated and sent to the receiving device. The receiving device demodulates the received signals, and the demodulated signals restore their original phase information that is compared to get the phase pulse signal. Therefore the phase measurement of the power line under test is indirectly achieved. Based on this technique, wireless phase detector for high voltage power transmission line was successfully designed and applied.

**Key words** high voltage electric power line phase wireless measurement

## 1 引言

相位与频率是工频交流信号的 2 个重要参数,同频正弦信号间相位差的测量在工业自动化、智能控制及通信、电子、地球物理勘探等许多领域都有着广泛的应用,如网络模型辨识、特性测试、故障诊断、电网的功率因素

测量、电机功角测试、介质材料损耗角的确定等。在电力系统监控中,常需要监视功率因数、有功功率 P、无功功率 Q 等,这些量直接与交流电的电压和电流的相位差角有关,特别是在电力系统中电网并网合闸、新发电站并网、新变电站投产前,输变电工程扩建、改造或主设备大修后,竣工投运现场经常要做核相实验。其中,包括核对相序和相位,即需要测量并网的两电网对应两相的相位

\* 本文于 2005 年 8 月收到,系常州市科技攻关项目(CE20040431)、中华人民共和国专利项目(专利号 ZL200520110018.3)、河海大学常州校区科技创新基金(04B002—02)、常州市青年科技人才培养项目(CQ2006004)资助项目。

差,以防止由于相序或相位不正确而短路,造成设备损坏,给用户带来不必要的麻烦等。并网合闸时要求两电网的电压之间的相位严格相同,因此,这时就需要较精确测量2个电网对应相之间的电压相位差,由此可以看出相位差测量的重要性<sup>[1-4]</sup>。

常规测量中大多数均采用有线方式直接测量,可得到较精确的结果,对于低压线路也较安全方便;但是对几kV以上的高压线路进行相位测量时,有线方式拖线长、操作不便且存在一定的危险性。因此,为了克服高压线路测量相位的缺点,本文提出一种高压电力线路相位无线检测的新方法。该方法主要采用2个发送装置和1个接收装置来完成。发送装置使用时与被测线路接触或接近,主要用于采集电压相位信号,并通过调制电路把电压相位信号发送到接收装置;接收装置把接收到的2路调制信号进行解调恢复出电网电压信号,把2路电网电压信号进行比较即可得到被测线路的相位差信号。

## 2 相位采集方法

高压电力线路电压很高,周围场强也很强,无线相位检测装置工作时,将发送装置的电极与高压单相线路接触(或接近),根据电磁场理论在电极上就可以耦合出具有相应相位关系的工频电磁信号,该电磁信号又能在电极电感线圈上感应出相应电动势 $\epsilon_i$ 。当电极距离高压电力线路为A时,根据“毕奥-萨伐尔定律”计算得出此时电极所处位置的磁感应强度为: $B = \frac{\mu_0 i}{2\pi A}$ 。又根据电磁感应定律,电动势 $\epsilon_i$ 的大小与穿过电感线圈的磁通量的变化率 $\frac{d\phi}{dt}$ 成正比即:

$$\epsilon_i = -\frac{d\phi}{dt} \quad (1)$$

式中:负号确定了感应电动势 $\epsilon_i$ 的方向。

由于 $\phi = BS = \frac{\mu_0 N i \pi r_1^2}{2\pi A}$ ,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;i为高压线的工频电流信号 $i = I \cos(\omega t + \phi)$ 。于是得出 $\epsilon_i = -\frac{d\phi}{dt} = \frac{\mu_0 N i \pi r_1^2}{2\pi A} \frac{di}{dt} = \frac{\mu_0 N i \pi r_1^2}{2\pi A} \omega I \sin(\omega t + \phi)$ 。可见 $\epsilon_i$ 的大小与高压电力线路电流i、电感线圈的各参数( $r_1$ 、N)、装置距离高压电力线路距离A等有关; $\epsilon_i$ 的相位与原来线路电流i的相位相差 $\pi$ 。

此电动势 $\epsilon_i$ 通过±15 V稳压管限幅稳压,再经过低通滤波电路处理得到此高压相的相位信号,由于原来高压相的电压和电流信号均为峰值很高的正弦信号,得到的 $\epsilon_i$ 较高,通过相对较低电压(±15 V)的限幅,即可得到近似的标准方波信号,如图1所示。

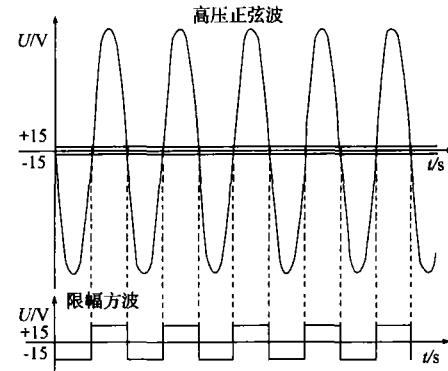


图1 高压正弦信号与限幅波关系示意图

在电路设计时,发送天线同时也作为信号采集处理电路(简称电极)。当高压线路进行相位检测时,电极与被测高压线路相接触(或接近),根据上述理论在电极上耦合出频率为工频的电磁信号,电磁信号在电极电感线圈上感应出电动势,通过限幅电路把电网电压信号取出。滤波后(方波信号)再分为2路:一路送至声光显示电路进行声光显示,表示装置已经正常工作;另一路送至发送模块进行ASK调制,经过发送模块调制后的电网电压方波信号又送回至天线发送到接收装置。电网电压相位信号采集和处理电路如图2所示。

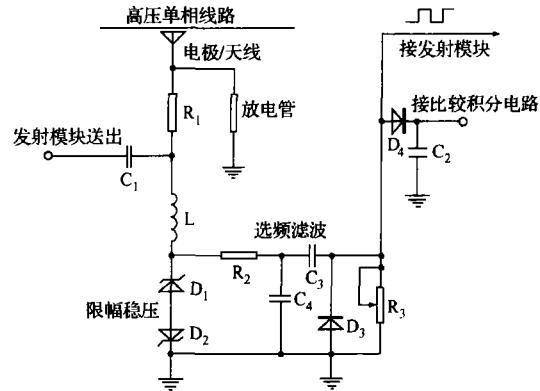


图2 电网电压相位信号采集和处理电路

## 3 数据无线传输方法

目前,无线数据传输在各个领域都得到了广泛应用,数字调制传输系统就是用数字基带信号调制载波的一种传输系统,这个系统也称为数字频带传输系统。数字信号有2种传输方式:(1)基带传输:数字信号直接传送的方式(是将信源发出的信息码经码型变换及波形形成后直接传送至接收端);(2)频带传输:用数字基带信号调制载波后的传送方式,频带传输的载波的波形是任意的,但大多数的数字调制系统都选择单频信号(正弦波或余弦波)作为载波。

数字调制有以下3种基本形式:振幅键控(ASK)、频移键控(FSK)、相移键控(PSK)。

在无线相位检测时需要进行无线传输的数据信号比较简单,传输距离相对而言较短,与日常通信系统中的数据通信有一定区别,对调制方式的带宽、误码率等性能参数没有特别高的要求。频移键控(FSK)、相移键控(PSK)均为非线性调制,在调制过程中涉及到载波信号频率和相位的变化,在接收过程中容易引起相位模糊。本设计中的测量对象是精确的相位差值,所以这2种方式不利于设计需求。综合考虑所设计的高压电力线路相位无线检测装置的实用性,显然FSK和PSK并不是最合适的选择。但是,振幅键控(ASK)调制与解调原理、设备需求最简单,同时由于所传输的信号简单、幅度变化小(方波信号中的“0”、“1”信号),可以避免忽略ASK调制对信道特性变化的敏感性差的不足。因此,高压线路相位无线检测方法设计时采用二进制振幅键控(2ASK),就是用二进制的数字信号去调制等幅的载波,即传“1”信号时,发送载波;传“0”信号时,送零电平。其实现模型如图3所示。

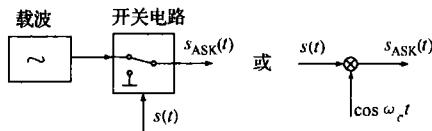


图3 2ASK调制实现模型

ASK信号的时间表达式为:

$$S_{ASK}(t) = s(t) \cos \omega_c t = \left[ \sum_n a_n g(t - nT_s) \right] \cos \omega_c t. \quad (2)$$

式中:

$$a_n = \begin{cases} 0, & \text{概率为 } P, \text{空号时域波形为 } g_1(t), \text{频域为 } G_1(f) \\ 1, & \text{概率为 } 1-P, \text{传号时域波形为 } g_2(t), \text{频域为 } G_2(f) \end{cases}$$

$s(t)$ 为随机的单极性矩形脉冲序列,其调制波形如图4所示。

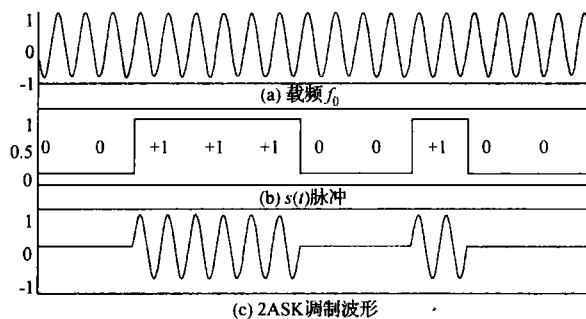


图4 2ASK调制时间波形

2ASK信号的接收(解调)主要有2种方式:非相干接收和相干接收,其组成框图如图5所示,在实际电路设计时选用非相干解调方式。

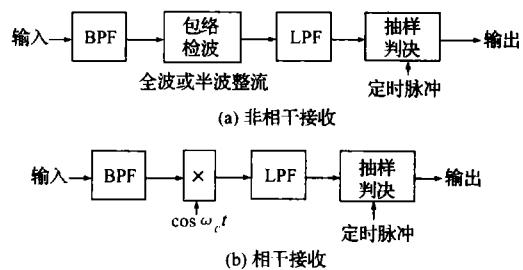


图5 2ASK信号接收系统组成框图

## 4 解决强磁场干扰的方法

### 4.1 产生干扰的原因

检测装置及其无线数据传输干扰指在工作数据频段内产生对有用信号造成损害的无用信号或电磁干扰。无用信号和电磁干扰不同,无用信号也是信号;电磁干扰是叠加在有用信号上的电磁噪声,它是除信号以外所有电磁发射或任何传输通道不应出现的电磁现象。

高压输电线路在导线周围形成一个强大的电场且导线表面场强较高,当输电线路表面电场强度超过空气分子的游离强度(一般在20~30 kV/cm)时,就可听到“刺刺”的放电声,嗅到臭氧(O<sub>3</sub>)的气味,夜间还可以看到导线周围发出的蓝紫色荧光,这就是电晕放电。当导线周围空间产生局部电晕放电时,在其交流正半波发射出不同频率的电磁辐射波,对线路邻近无线数据信号传输及装置产生干扰;绝缘子、金属元件连接处的间隙放电(火花)放射出的更高频率,也会产生时间断续的机率甚小的电磁波干扰。对于高压输电线路,这些干扰是不可避免的,因为输电线路设计时只考虑在好天气下不出现全面电晕时,但每天早、晚及不良气候下还是可能出现电晕的。随着电压的升高,先出现起始电晕,然后是可见电晕,最后形成全面电晕。由于电晕放射出不同强度和不同频率的电磁波,便形成装置及其无线数据传输的干扰根源。输电线路电晕产生的脉冲电磁波沿着线路两侧横向传播,无线发送接收模块受到脉冲电磁波干扰后,便会影响收发信号的质量,在正常工作时接收的有用信号的波形幅值和相位受到影晌,导致达不到正常工作所需的信噪比。在进行实际相位检测时,发送装置在同高压导线接触或接近时会产生明显的电晕现象。

电晕放电的单个脉冲很窄,脉冲宽度在0.1 μs量级。实际交流线路的电晕放电多发生在工频的正、负峰值附近,有一系列脉冲组成脉冲群,其波形十分不规则。脉冲群的持续时间约为2~3 ms。这样一系列的脉冲,必然产生丰富的高频分量。随着频率的提高,其频谱分量减少。大量的测量结果统计出输电线路电晕放电的频谱特性在0.15~4 MHz之间,一般无线电噪声的频谱特

性不受季节、时间、气候等条件的影响。输电线路的电晕可产生被称为电磁干扰(EMI)的高频噪声。研究表明,在数MHz以上的频率点,电晕噪声电平显著降低。输电线路电晕对无线电的干扰,主要是指对无线电接收机的中波段(535~1 605 kHz)内的干扰,而在一般情况下,输电线路对短波的干扰很小<sup>[5-9]</sup>。

#### 4.2 抗干扰的措施

解决抗干扰问题需要选择发送模块的合适频率(2个发送模块的发射接收频率分别为433 MHz和315 MHz),以及合理的对发送接收信号进行处理,在装置中设置滤波等电路得到50 Hz的有用信号。在高压无线相位检测装置设计的同时采用屏蔽、数字地和模拟地严格一点供地,屏蔽地,加去耦电容和放电管等措施解决磁场抗干扰问题以及无线数据传输问题<sup>[10]</sup>。

### 5 实验

实验目的是为了验证所设计的高压无线核相仪测量高压电力线路电压相位差的精度和无线通信距离。

实验主要利用2组调压器和2组高压实验变压器(调压器和高压实验变压器串联在一起,调压器主要用于改变实验变压器的输出电压,使其在6~35 kV范围内变化)来完成。实验时调压器的输入端采用2种接线方式:一种方式是将2个调压器输入端接在三相电源同一条端线上构成同相电路,即相当于构成2个同相电网;另一种方式是将2个调压器输入端接在三相电源不同的端线上构成异相电路,即相当于构成2个异相电网。实验时要求接收装置同2个实验变压器保持一定距离(测量发送装置的最大发送距离),把高压无线核相仪测量的2个实验变压器输出端的电压相位差与示波器测试调压器输入端的电压相位差比较,实验结果表明,高压无线核相仪测量精度在1°以内。通过调整发送模块的供电电压(设计时采用5 V供电)和天线的长度(设计时发送天线的长度取16 cm,接收天线的长度取10 cm)可以限制发送距离在50 m以内。目前电网并网核相时两电网同相和不同相的相位差值,国外的标准是相位差值小于10°认为是同相,相位差值大于30°认为是异相,所以设计的高压无线核相仪符合电网并网核相的检测要求。

### 6 结论

高压无线核相仪可以对6~35 kV高压线路进行相位检测,为了保证在通信过程中不对其他设备产生影响,在设计时限制了其通信距离不能超过50 m。此项技术的进一步研究,可推广应用到对高压电力线路避雷器阻性泄漏电流的无线检测等场合。

#### 参考文献

- [1] 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.
- [2] 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.
- [3] 刘公致. 一种较精确的相位测量方法[J]. 杭州电子工业学院学报, 1999, 19(3): 44-50.
- [4] 张家生, 刘扬. 相位检测方法研究[J]. 仪器仪表学报, 2004, 24(4): 307-309.
- [5] 张启春, 阮江军, 喻剑辉, 等. 高压架空线附近的工频磁场[J]. 电力环境保护, 2000, 16(2): 10-12.
- [6] 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.
- [7] 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.
- [8] 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.
- [9] 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.
- [10] 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.

#### 作者简介



张金波,男,1967年出生,博士研究生,副教授,主要研究方向为电力系统及其自动化。  
E-mail: zhangjb@hhuc.edu.cn