

Fault Monitoring System Design for High-Voltage Lines Based on ZigBee and GPRS Technology

Yi Duan¹, Xiaoping Chen¹, Zheng Wang²

¹School of Electronics and Information Engineering, Soochow University, Suzhou

²Changshu Huangchao Technology Co., Ltd., Changshu

Email: duanyi_duanyi@163.com

Received: Nov. 12th, 2013; revised: Nov. 14th, 2013; accepted: Nov. 15th, 2013

Copyright © 2013 Yi Duan et al. This is an open access article distributed under the Creative Commons Attribution License, which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

Abstract: This paper introduces design of long-distance fault monitoring system for high-voltage lines. Remote transmission uses GPRS communications technology to send information to the display software on host computer of the monitoring center. The monitoring nodes exchange data within a short distance by forming ZigBee network. CC2530 RF chip modules are used to build up ZigBee network, and SIM900A is selected as GPRS module. The energy of the monitoring node and gateway node is obtained by the mutual inductance of high-voltage lines. They can operate stably outside for a long time.

Keywords: ZigBee; GPRS; High-Voltage Lines; Fault Monitoring; Supercapacitor

基于 ZigBee 和 GPRS 技术的高压线故障监测系统设计

段毅¹, 陈小平¹, 王铮²

¹苏州大学电子信息学院, 苏州

²常熟皇朝科技有限公司, 常熟

Email: duanyi_duanyi@163.com

收稿日期: 2013 年 11 月 12 日; 修回日期: 2013 年 11 月 14 日; 录用日期: 2013 年 11 月 15 日

摘要: 本文设计了无线远距离的高压输电线故障监测系统方案, 远程传输使用 GPRS 通信技术将信息发送至监控中心, 监测结点间构成 ZigBee 网络进行短距离数据交换。ZigBee 网络使用 CC2530 射频芯片模块组成, GPRS 模块选用 SIM900A 模块。整个系统故障监测结点和网关节点的能量来源于高压输电线电磁线圈互感取电方式, 可长期在户外稳定工作。

关键词: ZigBee; GPRS; 高压输电线; 故障监测; 超级电容

1. 引言

电能的安全正常传输是保证社会生产生活正常进行的先决条件。当电能输送发生故障时将会对我们的日常生活带来极大影响, 及时尽早的排除故障和保证电力的继续正常输送对于生产生活十分必要。由于高压输电线一般架空在室外, 有的地方可能更是荒芜人烟, 如果输电线发生故障(一般为短路、断路和

接地), 及时找到线路故障所在地是排除故障的第一步。

传统的翻牌指示型故障指示器可以悬挂在架空型高压线上, 当故障发生时, 其会动作翻牌使其底部看上去是红色以此指示线路故障。但需要工作人员沿路查看指示器状态, 才能决定故障所在地, 所以需耗费大量时间精力, 无法第一时间找到并排除故障。文

献[1]研究了基于 GPRS 技术的故障指示器,虽然可以传输故障信息给电力维修部门,但由于每个指示器都需配备 GPRS 信息发送模块并申请手机号码和数据流量,成本也较大。另外现今的翻牌型故障指示器无需远程发送信息,故功耗较低,使用电池进行供电,寿命较短;文献[1]中所研究的故障指示器也是基于太阳能电池,受天气影响很大,限制了其推广。

本文研究的基于 ZigBee 和 GPRS 技术的架空型高压输电线自取电故障监测系统可以很好的解决上述问题^[2,3],它采用 ZigBee 和 GPRS 相结合的技术,配电控制中心的故障定位软件系统与现场大量的故障检测和指示装置相配合,在故障发生后的数分钟之内即可给出故障位置和故障类型的指示信息,帮助电网部门以最快速度排除故障恢复电力供应。且现场故障监测装置的电能来自高压输电线,只要高压输电线中有工作电流便可以保证指示器在线上稳定工作。本文主要阐述该系统的整体架构和软硬件设计要点。

2. 故障监测系统整体架构

基于 ZigBee 和 GPRS 技术的高压线故障监测系统主要采用三个层次两个网络,三个层次分别为:监控中心、网关节点、故障监测节点。两个网络分别为 ZigBee 短距离无线网络、GPRS 远距离通信网络。ZigBee 网络将故障监测节点和网关节点联系起来,故障监测节点可以将线路故障信息和线路电流数据传输到网关节点;网关节点将接收到的故障信息和电流数据通过 GPRS 通信网络发送到监控中心的主机;工作人员可以据此定位故障地点。整个系统的架构如图 1 所示。

3. 故障监测节点和网关节点的硬件设计

3.1. 故障监测节点的体系结构

故障监测节点的硬件结构主要四部分组成:电流互感取电模块、备用电源充放电模块、母线电流互感采样模块、ZigBee 无线通信模块(包括主控芯片在内)。电流互感取电模块主要是通过电磁互感原理将高压线路上的高电压大电流转换为可以供 ZigBee 无线通信模块可以使用的电源;备用电源充放电模块主要是将电流互感取电模块产生的多余能量收集存储起来,以便在短时间取电不足时供给 ZigBee 无线通信模块

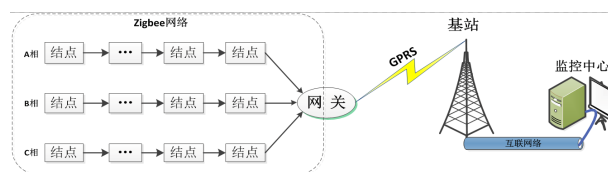


Figure 1. System architecture of wireless long-distance fault monitoring system for high-voltage lines
图 1. 无线远距离高压输电线故障监测系统的架构

使用;母线电流互感采样模块主要是对母线电流进行转换,产生与之对应的小电压信号供主控芯片采样;ZigBee 无线通信模块主要是对高压线路的电流进行检测判断,将故障信息和电流数据通过 ZigBee 网络发送到网关节点并且其内部主控芯片对其他模块进行控制。故障节点的结构图如图 2 所示。

3.2. 故障监测节点的电流互感取电模块

电流互感取电模块分三个部分:取电线圈部分、限压过流保护部分、电压转换部分。

取电线圈部分是指高压母线从一块环状铁芯内部穿过,环状铁芯上缠绕约 200 匝线圈。通过线圈得到初始的交流电源,再经整流滤波后得到直流电源。

限压过流保护部分主要使用 LMV431 芯片,其电路原理图如图 3 所示。初始状态下芯片 C 脚和 A 脚间是不导通的,但当 R 脚和 A 脚间电压超过 1.24 V,其 C 脚与 A 脚内部导通,电流经过电阻 R8 上产生电压,随着 R8 两端电压上升,四个场效应管 MCH3484 开始导通,电流便可以通过 R4、R5、R6、R7 四个功率电阻泄放能量,这样便可降低铁芯内部的磁通量变化率,使线圈感应电压降低,达到限压保护的目的。

电压转换部分使用的电压转换芯片是 TPS61200 开关电源稳压芯片,其原理图如图 4 所示。其最大的特点是可以有极低的输入电压,输入电压范围为 0.3 V 到 5.5 V,输出电压范围为 1.8 V 到 5.5 V。在升压模式和降压转换模式之间可以自动转换,转换效率高。由于限压过流保护部分存在,其输入电压不会超过正常工作范围。电压转换部分输出 3.5 V 电压供无线通信模块使用。

3.3. 故障监测节点的母线电流互感采样模块

母线电流互感采样模块同样是在原有的铁芯上缠绕采样线圈,为保证计算电流值的精度,线圈匝数为 1000 匝。为保护后续器件,防止瞬间感应电压过

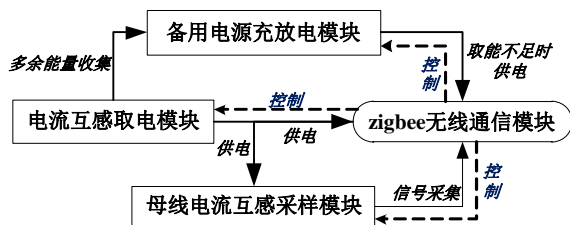


Figure 2. Structure of fault monitoring node
图 2. 故障监测节点的结构

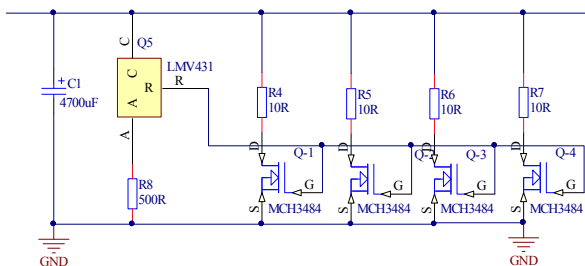


Figure 3. Principles of pressure limiting and overcurrent protection
图 3. 限压过流保护原理

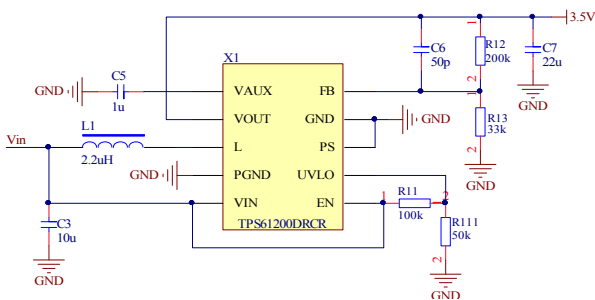


Figure 4. Principle of TPS61200 chip in voltage conversion section
图 4. 电压转换部分 TPS61200 芯片原理

大，其两端接瞬态抑制二极管。

母线电流互感采样模块原理如图 5 所示。线圈首先接入整流桥，交流电转换成直流电。整流桥选用是 MB2006 低压降整流桥，其在通过电流为 2 A 时压降也仅为 0.70 V。RS 为采样电阻，其流过的电流值约为母线电流值的 1000 分之一。场效应管 Q1 控制采样线圈的通断。精密高边电流检测放大器 LMP8645 接入 RS 两端，其差分电压输入可达 30 V，这样就使 ZigBee 无线通信模块的主控芯片 IO 口与采样电阻隔离开来，防止在 Q1 关断时线圈产生的高电压对主控芯片的冲击。电阻 RG 控制其放大倍数，在此选择的放大倍数为 2，LMP8645 输出端接无线通信模块主控芯片的采样端口 ADC_pin。

3.4. 故障监测节点的备用电源充放电模块

备用电源充放电模块中的储能器件使用的是超

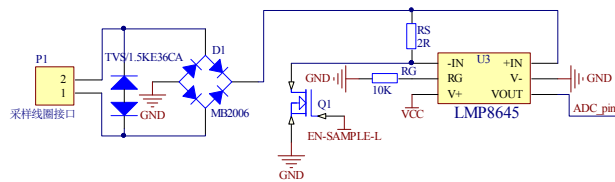


Figure 5. Principle of busbar current mutual inductance sampling module
图 5. 母线电流互感采样模块原理

级电容^[4]。超级电容具有高能量密度、寿命长、高低温特性优良、最大等效串联电阻 ESR 低的特点。由于故障监测节点长时间悬挂在室外高压线上，而锂电池的充电使用温度一般在 0 摄氏度以上，本设计使用超级电容作为备用电源的储能器件。本模块选用的是 30F/5.4V 的超级电容，其最大储能为 436 J，足够支持采用低功耗软件设计的 ZigBee 无线通信模块持续工作 10 个小时以上，完全可以保证短时间线路在电流过低或断电等取能不足的情况下的电路正常工作。

电路的充电采用可变电流方式，每次计算母线电流值之后相应的改变充电电流值，以达到快速充电的目的，故障监测节点的可变电流充电原理如图 6 所示。备用电源充放电模块首先将电流互感取电模块的 3.5 V 电压升压至 5.4 V 以上，而后通过场效应管和采样电阻对超级电容进行充电，采样电阻 R22 两端接入高边电流检测放大芯片 MAX4372T，其输出的电压为采样电阻电压的 20 倍，用该电压与 TLV5616 芯片的输出电压通过运算放大器 MC33503 比较的输出控制场效应管得导通与关断程度，达到控制充电电流大小的功能。TLV5616 芯片是低功耗数模转换芯片，ZigBee 无线通信模块中的主控芯片通过 SPI 串口与之相连来设置其输出的电压值，其输出范围为 0 V 至电源电压。超级电容的放电部分同样使用电源芯片 TPS61200，将超级电容储存的电能量降压后供无线通信模块使用。

3.5. 故障监测节点的 ZigBee 无线通信模块

ZigBee 无线通信模块内主要采用的 2.4 GHz 公共频段射频芯片 CC2530。CC2530 能够以较低成本组成强大的节点网络。内置优良性能的 RF 收发器，集成了增强型 8051CPU，具有不同的功耗运行模式，尤其适用于低功耗要求的系统。CC2530 除了用来进行 ZigBee 网络间数据通信外，还控制着母线电流互感采样模块和电流互感取电模块的开关，以及备用电源充

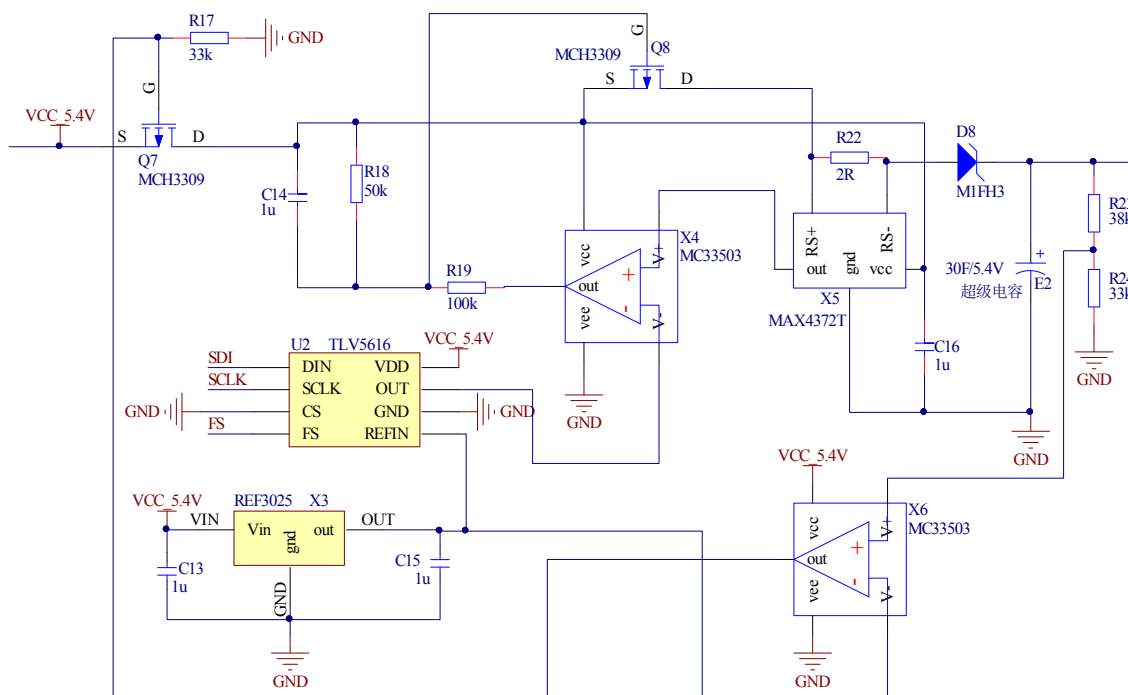


Figure 6. Principle of variable current charging in fault monitoring node
图 6. 故障监测结点的可变电流充电原理

放电模块的充电电流大小等。

为增大 ZigBee 网络结点间的通信距离，在 CC2530 芯片内部已集成了 RF 收发器的基础上添加了外部射频放大器 CC2591 来配合 CC2530 芯片使用。CC2591 的发送功率可以达到 22-dBm，还可提高 CC2530 芯片 6-dB 的接收灵敏度。经过实地测试，加装 3dB 增益天线(仅 5 cm 左右长度)可以使结点间的通信距离达到 1000 m 以上，完全可以满足本系统的使用要求。

3.6. 网关结点的硬件设计

网关结点的硬件设计是故障监测结点的硬件基础上增加了 GPRS 通信模块和其电源部分。GPRS 模块采用的是 SIM900A 无线通信模块，它将采集到的线路状态信息通过 GPRS 发送至监控中心主机。SIM900A 可以低功耗实现语音信息、短信息发送接收，待机睡眠功耗仅 1 mA。它通过 UART 串口与 CC2530 连接在一起，CC2530 可以使用标准的 AT 指令对 SIM900A 模块的数据收发和功耗水平等进行控制，稳定性强。

由于 SIM900A 在发送数据时最大电流可达 2 A，所以靠近电源引脚部分需添加较大的电容来保证电

压的稳定性，这里选用的是两个 100 uF 的低 ESR 钽电容并联。SIM900A 最佳供电电压为 4 V，必须在电流互感器取电模块的输出端后增加升压电路，得到 4 V 稳定电压提供 SIM900A 使用。

4. 故障监测结点和网关结点的软件设计

4.1. 故障监测结点和网关结点的功能

故障监测结点用来监测母线上的电流变化，根据电流的变化来判断线路状态以及控制备用电源模块的充放电，并且将线路的故障信息通过 ZigBee 网络发送至网关和充当 ZigBee 网络的路由器对接收到的 ZigBee 数据包进行转发。

网关结点无需判断线路状态，只需控制备用电源模块的充放电，接收存储来自故障监测结点的状态信息，并及时将它们通过 GPRS 网络传输到监控中心的主机上。

4.2. ZigBee 无线通信模块的软件主体

ZigBee 无线通信模块的软件主体采用的是 TI 公司的 MAC 软件协议栈。该协议栈采用 OSAL 操作系统，类似于 $\mu\text{C}/\text{OS_II}$ 操作系统，其处理任务采用轮询机制，系统中各层初始化以后将进入低功耗模式。

当有任务事件发生时,进入中断,比较任务的优先级,优先级高的任务先处理,优先级低的任务后处理。所有的任务分为三层:硬件处理层 HAL、无线通信处理层 MAC 和应用事物处理层 MSA。我们主要对 HAL 层和 MSA 层进行操作来完成整个无线通信模块的控制和通信功能。OSAL 操作系统的工作流程如图 7 所示。需要协调和处理的事件主要有结点采样的开启与关闭、采样数据的计算和故障判断、ZigBee 接收机的开启关闭、ZigBee 数据的发送等。

4.3. ZigBee 无线通信模块的软件低功耗设计

由于高压线路的自身特点所致,悬挂在线路上的故障监测结点是一字排开的。离网关较远的监测结点需要通过其它故障监测结点的接收转发才能将线路状态信息通过 ZigBee 网络发送到网关结点。故障监测结点在 ZigBee 网络中既作为检测终端,同时也作为路由器。因此若在保证通信线路畅通就必须保持作为路由器的故障监测结点的 ZigBee 无线通信模块接收机一直处于开启状态,这就极大的增加了结点的功耗。为节省能量消耗,我们采用 Wake-on-Radio (WOR) 方法解决该问题^[5]。

该方法是指 CC2530 芯片周期性的从深度睡眠模式中醒来侦听潜在的 ZigBee 数据包,即周期性的开启射频接收模块。当一个结点发送数据时,它会持续性的发送一段时间直到对方接收或规定的持续时间结束。WOR 方法的收发示意图如图 8 所示。

其中 TX 表示发送 ZigBee 数据, IDLE 表示发送数据间的等待时间, RX 表示开启射频接收模块, SLEEP 表示关闭射频接收器进入休眠状态(此时功耗最低)。为保证在接收方开启射频接收模块的时间内可以完整的接收到对方发送数据,接收方必须保证 $T_{RX} > T_{TX} + T_{IDLE}$ 且发送方的发送持续时间大于射频接收模块的休眠与开启周期(即 $T_{RX} + T_{SLEEP}$)。本系统中的射频接收模块休眠与开启周期为 350 ms,开启时间持续 5 ms;结点数据发送持续时间为 350 ms,单次发送周期为 3 ms。经测试无线通信模块的整体功耗实际不到 0.5 mA。

4.4. 故障监测结点的线路电流计算

故障监测结点要对线路的状态进行判断就必须先测得母线的电流值。故障监测结点的母线电流互感

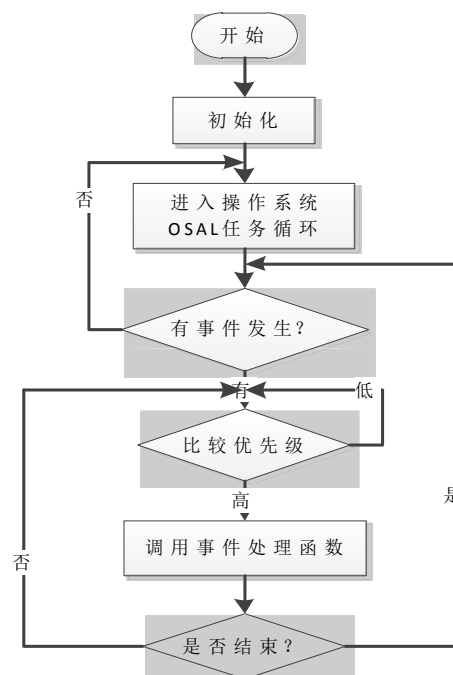


Figure 7. OSAL operating system workflow
图 7. OSAL 操作系统的工作流程

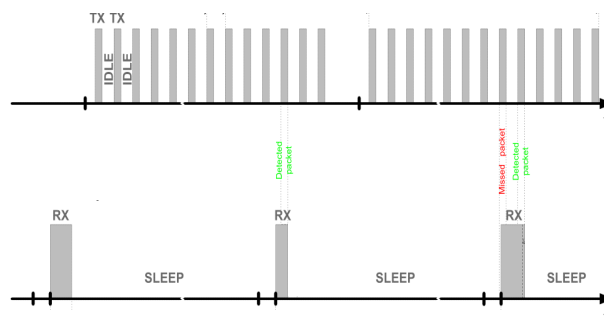


Figure 8. WOR method transceiver schematic
图 8. WOR 方法的收发示意

采样模块输出的波形并非正弦波形,而是整流后的正弦波形。其幅度值基本上与 50 Hz 母线电流有效值成线性函数关系。故只需得到整流后的正弦波幅值便可以知道母线的电流值。

如图 9 所示,其为母线电流互感采样模块输出波形。我们对母线电流互感采样模块输出波形进行采样,将该波形采样值修正为相应值正弦波的采样值(只需将一个半波周期的采样值变为负数,另一个半波周期采样值保持不变),对修正的采样值进行傅里叶变换处理即可得到该波形的幅值。表 1 为计算的幅值与母线电流对应表。如图 10 所示为计算幅值与母线电流拟合曲线图。可以看出幅值与母线电流值成线性关系,可以由幅值计算出母线电流值的大小。

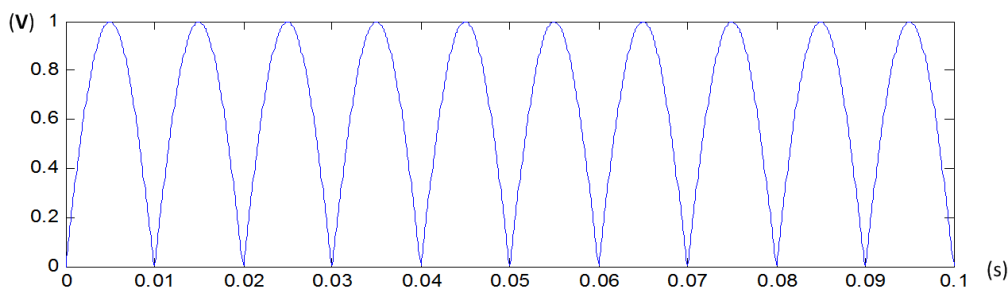


Figure 9. Output signal waveform of busbar current mutual inductance sampling module
图 9. 母线电流互感采样模块输出示意波形

Table 1. Correspondence table of the busbar current and amplitude
表 1. 幅值与母线电流对应表

母线电流值(A)	4.98	8.52	10.14	15.18	20.4	30.3	40.62	50.4	60.12
电压幅值(V)	0.011	0.027	0.034	0.057	0.079	0.121	0.167	0.210	0.252
母线电流值(A)	70.62	80.88	90.54	100.6	120.6	150.6	180.9	200.9	
电压幅值(V)	0.299	0.343	0.385	0.429	0.516	0.645	0.776	0.858	

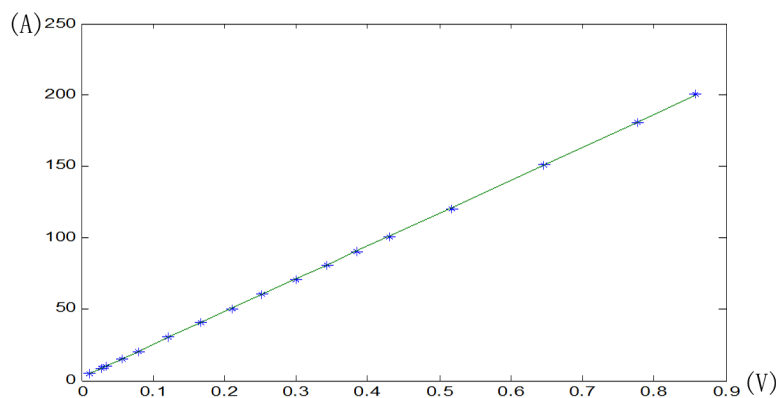


Figure 10. Curve fitting between calculated amplitude and the busbar current
图 10. 计算幅值与母线电流拟合曲线

5. 结语

使用 ZigBee 和 GPRS 相结合的技术, 可以很好地解决现有高压线路的故障监测装置难以实时通知或成本太高的问题, 该方案及时的将故障信息传送到监控中心的主机上, 使工作人员第一时间发现故障所在, 尽可能快的排除故障, 并且将成本也控制在较小的范围内, 可以进行大规模的推广使用。本文设计的电源模块亦可用于其他高压输电线在线测量装置的供电。虽然该系统设计方案是以高压线故障监测为目的, 但也可以用于的远距离小范围监测或控制系统, 例如中心城市路灯照明控制系统等。

参考文献 (References)

- [1] 唐述宏, 季涛, 宋红梅 (2006) 基于 GPRS 技术的配电线路故障自动定位系统. *电力自动化设备*, **8**, 59-62.
- [2] Zhang, Q., Yang, X.L., Zhou, Y.M., et al. (2007) A wireless solution for greenhouse monitoring and control system based on ZigBee technology. *Journal of Zhejiang University SCIENCE A*, **10**, 1584-1587.
- [3] 瞿雷, 刘盛德, 胡咸斌 (2007) ZigBee 技术及应用. 北京航空航天大学出版社, 北京.
- [4] Xu, Q.S., Bian, H.H. and Zhao, W.R. (2010) EDLC charging performance for microgrid applications. *Journal of Southeast University (English Edition)*, **26**, 415-420.
- [5] 吴瑾, 潘启勇, 王宜怀, 倪敬飞 (2011) 车间设备监控节点的 ZigBee 组网方法应用研究及低功耗策略. *计算机应用与软件*, **9**, 257-260.