

一种基于单线圈涓流式高压线路 电流传感装置技术研究

侯克男 杜君 王宏志 刘立宗 禹丹

(北京智芯微电子科技有限公司, 北京 100192)

摘要 本文主要提出一种基于单线圈涓流式高压线路电流传感装置，并详细阐述了单线圈涓流技术的实现方法。该装置主要使用一个电流互感器，即可实现高压线路上的能量提取和电流感测，在重量和体积上具有明显优势，而且更加的小巧轻便，方便安装。另外，装置主要采用超级电容来存储从高压线路提取的电能，并通过超级电容放电，为装置的正常工作提供电能。同时在超级电容电路周围设计了配套保护电路，使其适应变化范围很宽的电流。

关键词： 电流互感器；涓流充电；超级电容

The Technology Research of the Single-coil Current Sensing Device Installed in Higher Voltage Lines for Trickle Charging

Hou Kenan Du Jun Wang Hongzhi Liu Lizong Yu Dan

(Beijing SmartChip Microelectronics Co., Ltd, Beijing 100192)

Abstract This paper describes the single-coil current sensing device installed in higher voltage lines for trickle charging, and presents the method of single-coil current sensing device for trickle charging. The device can achieve the function of obtaining electricity and monitoring the current for using only one current transformer. This device has many obvious advantages in weight and volume, and it is small and easy to install. In addition, the device with the super capacitor can store electrical energy from higher voltage lines, and this super capacitor discharges to provide electrical energy for the device. At the same time, there are some protection circuits around the super capacitor, so the device could monitor the wide range of current.

Keywords: CT; trickle charging; super capacitor

目前高压线路电流传感装置的电源部分主要采用电池、电磁感应等供电方式。电池供电虽然稳定，不受高压电力线上功率变化的影响，但电池的寿命相对较短，特别是对于不可充电池，每次电能耗尽之后，都需要停电更换电池，有些电流监测装置密封无法打开，电池耗尽后无法更换，导致电流监测装置无法继续使用；有些可拆卸的电流传感装置使用充电电池，而充电电池虽然寿命相对较长，但充电电池具有“记忆效应”，而且成本较高^[1]。所以电池并不是电流传感装置理想的供电解决方案。

利用电磁感应给电流传感装置提供电能的方案尽管目前已有应用，但大多需要使用单独的电流互感器来实现能量提取，即需要使用两个空间上彼此

分离的互感器，一个互感器用于能量提取，另一个互感器用于电流感测^[2]。采用这种方案的装置由于需要两个磁心，不仅导致重量沉、体积大，而且成本也高，不利产品化。而且对于宽范围（几安培至几百安培）的线路电流，一种互感器设计往往不能同时满足能量提取和电流感测的需要，因此需要根据电流范围，分别设计互感器，这就造成要多次设计，最终产品的通用性不高。

针对上述现有技术的不足，本文提出一种基于单线圈涓流式电流传感装置，该装置主要使用一个电流互感器，即可实现能量提取和电流感测，并通过超级电容来存储前端所提取的电能。

1 单线圈涡流式电流传感装置技术及工作原理

单线圈涡流式电流传感装置包含一个磁心和其上绕制的一组线圈构成的互感器。通过取能/采样切换单元的切换控制，使取能和传感电路按照一定模式交替进行工作^[3]。本文的装置采用超级电容来存储前端线圈取出的电能，并设置超级电容保护电路来保护超级电容和后级电路，防止充电过快而被损坏。采用涡流式充电模式弥补超级电容在充满电后由于本装置工作而造成的电能损失，并在本装置中内置锂电池作为备用，为整个装置正常工作提供所需电能。

本装置的硬件原理框图如图 1 所示，主要由一个互感器、电流泄放保护单元、电流采样与保护单元、过流检测迟滞控制单元、整流单元、取能/采样切换单元、储能与电源管理单元、DC/DC 转换单元、硬件定时单元、电源输出控制单元、MCU 单元及射频收发单元组成。

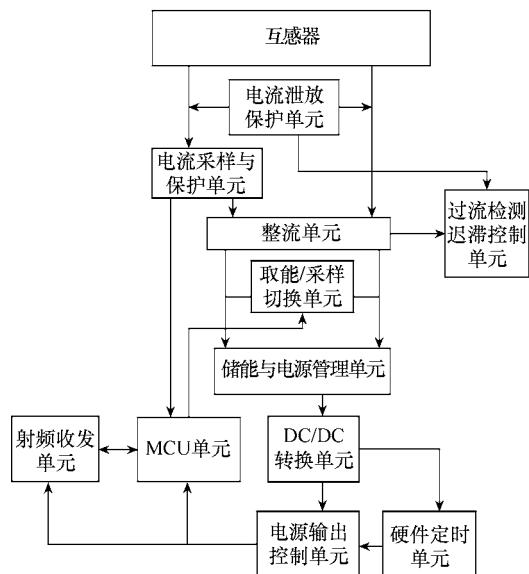


图 1 电流传感装置的原理框图

现详述整个装置的工作原理及流程：

1) 电流泄放保护单元断开，取能/采样切换单元工作在取能模式，互感器输出信号通过电流采样与保护单元到达整流单元。

2) 过流检测迟滞控制单元将整流单元输出的信号反馈给电流泄放保护电路，当过流检测迟滞控制单元检测到互感器输出电流过大时，控制电流泄放保护单元短路，以保护后级电路，防止大电流对后级电路造成损坏。

3) 整流单元将交流电转化为直流电并输出到储能与电源管理单元。

4) 储能与电源管理单元存储电量后输出到 DC/DC 转换单元，DC/DC 转换单元输出稳定的直流电为硬件定时单元供电。

5) 当硬件定时单元计时达到预设的导通时间时，输出控制信号使电源输出控制单元闭合，为 MCU 单元和射频收发单元供电。

6) MCU 上电后，控制取能/采样切换单元，使之切换到采样模式，通过电流采样与保护单元将采样信号输出到 MCU 单元。MCU 单元采样、计算电流值并通过射频收发单元将电流数据发送出去，发送成功后，MCU 单元发出控制信号，使取能/采样切换单元切换到取能模式，继续为储能与电源管理单元充电并存储能量。

7) 当硬件定时单元计时达到预设的关断时间时，发出控制信号使电源输出控制单元断开，停止为 MCU 单元和射频收发单元供电。

以上为单线圈涡流式电流传感装置工作原理及全部流程。

2 单线圈涡流式电流传感装置硬件原理及组成

本装置主要由一个互感器、电流泄放保护单元、电流采样与保护单元、过流检测迟滞控制单元、整流单元、取能/采样切换单元、储能与电源管理单元、DC/DC 转换单元、硬件定时单元、电源输出控制单元、MCU 单元及射频收发单元组成。以下具体介绍各硬件组成部分及原理。

2.1 互感器

本文使用一个互感器实现了取能和电流感测。互感器视图如图 2 所示，由铁心 D、缠绕在铁心 D 上的线圈 C 组成。铁心 D 可以采用硅钢铁心、坡莫合金和超微晶等材质的磁心，但并不局限于以上三种。本文中使用的是坡莫合金材质制成的磁心。它具有很宽的磁导率范围，最大的突出特点是具有很高的弱磁场导磁率^[4]，也就是说，当电力线上的电流在 2A 左右时，也可以高精度地传感电流信号。同时它还具有比较高的饱和磁感应强度，传感电力线上达到 300A 以上的大电流时也不会出现饱和现象。同时，在线圈线径的选取方面，采用相对较粗的 QZ-2/180 型高耐压、高耐温聚酯漆包线，可瞬间承受电力线 20 倍电流过载能力，并保证在 1min 内

线圈无损坏现象发生^[5]。这样的一种磁心和线圈的设计配合超级电容保护电路便实现了本装置宽范围电流传感与取能。线圈主要用于本装置的取能和电流测量，其感应出来的电流一方面用于电流采样，另一方面是经整流单元后供给储能与电源管理单元，并将提取出来的电能存储。

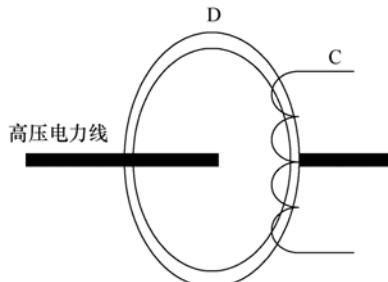


图 2 互感器视图

2.2 过流检测迟滞控制单元和电流泄放保护单元

过流检测迟滞控制单元的作用是检测互感器输出电流的大小，当互感器输出电流过大，超出本装置的检测范围时，控制电流泄放保护单元闭合，使互感器输出短路，断开后级电路，从而保护后级电路单元，防止大电流对后级电路造成损坏。正常工作状态时，电流泄放保护单元断开，互感器输出级开路，互感器输出经过电流采样与保护单元作用到整流单元。

2.3 电流采样与保护单元

电流采样与保护单元用于将互感器感应出的二次侧交流信号，经后端并联采样电阻（如图 3 中的 R_1 和 R_2 ）后生成电压信号，并将电压信号送至 MCU 的采样端口，进行信号的传感处理工作。电路设计上，考虑到由于电力线路异常大电流情况下，可能出现后端采样电阻上的采样电压过高会烧掉 MCU 芯片这类情况，因此出于保护芯片和后级电路的目的，限制了输入 MCU 端口 AD0+ 和 AD0- 的峰值电压不得超过 $\pm 0.6V$ ，由此反推到采样电阻上的交流峰-峰值电压不得超过 $1.2V$ ，所以此单元的前端，并联两路二极管（图 3 中 D_1 — D_4 ），用二极管的正向导通特性起到了限制采样电阻上的交流电压过高的目的。常规设计时，多采用稳压二极管和 TVS 管实施保护，其提供的电压保护等级最小做到 $3V$ ，想要达到 $1V$ 左右，或是更低的电压保护等级是不可能的。对此，本文采用串联二极管的方式达到 $\pm 0.6V$ 区间内。采样电阻后端，MCU 采样前端加了 RC 低通滤波环节（图 3 中 R_3 、 R_4 、 C_1 和 C_2 ），起到修正波形的目的。

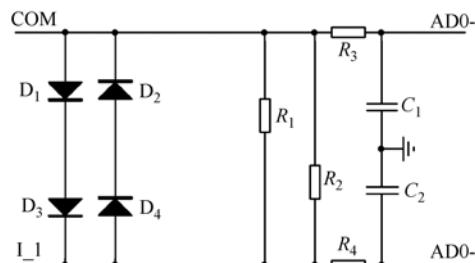


图 3 电流采样与保护单元

2.4 整流单元与取能/采样切换单元

整流单元与取能/采样切换单元如图 4 所示，整流单元的作用是将交流电转化为直流电，本文所采用的是整流桥，但不局限于此；取能/采样切换单元的作用是在 MCU 单元的控制下，使装置工作在取能模式或采样模式。

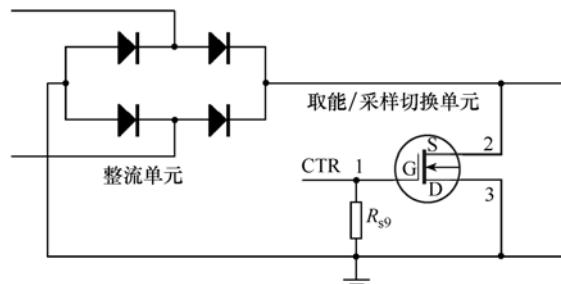


图 4 整流单元与取能/采样切换单元

具体工作原理如下：取能/采样切换单元接收 MCU 单元一个 I/O 口输出的 CTR 信号，作为其输入信号，初始工作状态时，CTR 信号接下拉电阻 R_{s9} ，CTR 信号为低电平，MOS 管 Vs1 断开，装置工作在取能模式；当 MCU 单元上电，控制 CTR 信号为高电平，MOS 管 Vs1 导通，整个装置工作在采样模式。当传感的电流数据通过射频收发单元发送结束后，MCU 单元控制 CTR 信号为低电平，MOS 管 Vs1 断开，装置工作在取能模式。

2.5 储能与电源管理单元

储能与电源管理单元由超级电容、锂电池、超级电容保护电路及电源管理电路组成，如图 5 所示。超级电容用于存储及释放电能，锂电池作为备份电源，在超级电容保护电路和电源管理电路的控制下，超级电容和锂电池共同完成电能供给任务，具体过程是：锂电池作为备份电源，当超级电容充电不足

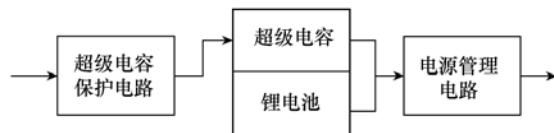


图 5 储能与电源管理单元

时，通过电源管理电路切换到锂电池供电。

1) 超级电容保护电路

超级电容保护电路由两个稳压管并联组成，如图 6 所示。在互感器输出电流过大，例如超过 300A 时，泄放掉过大的电流，保证超级电容能在互感器初级线圈在大电流（300A 电流以下）时，避免过充而损坏。从而实现互感器输入电流从 2~300A 时，装置都能正常供电和电流采样。超级电容最大充电电压为 5V，当超过 5V 时，由超级电容保护电路自动泄放电流，从而将超级电容稳定在 5V 以内。

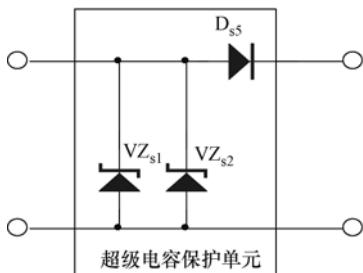


图 6 超级电容保护单元

2) 超级电容

首先，当硬件定时单元输出的 PWM 信号为高电平时，电源输出控制单元断开，取能/采样切换单元为取能模式，超级电容处于充电状态；其次，当硬件定时单元输出的 PWM 信号为低电平时，电源输出控制单元闭合，MCU 单元上电，MCU 单元控制取能/采样切换单元为采样模式，超级电容开始释放电能并完成整个系统的电能供给。

3) 锂电池

锂电池作为备份电源，在超级电容储能不足（即超级电容充电电流过小，在一个充电周期内，超级电容存储的电量过少而不能满足后级电路工作所需电量）的情况下由锂电池提供整个装置的工作电能。

4) 电源管理单元

电源管理单元用于自动切换超级电容供电或者锂电池供电，在通常情况下，超级电容的电压高于锂电池电压，锂电池作为备份电源而不工作，整个装置的供电由超级电容完成，在极少出现的特殊情况下（即超级电容的充电电流过小，在一个充电周期内仍不能存储足够的电能供后级电路使用），也就是超级电容储能不足时，电源管理单元自动切换到锂电池供电。这种双保险的设计使装置的供电更加稳定。

2.6 DC/DC 转换单元

DC/DC 转换单元的作用是把储能与电源管理

单元输出的电压不稳定的直流电转换为稳定的直流电源输出，为硬件定时单元、MCU 单元及射频收发单元供电。为了保证硬件定时单元计时精确，硬件定时单元的电源必须稳定。本装置的方案采用的是 NCP1402，但不局限于此。

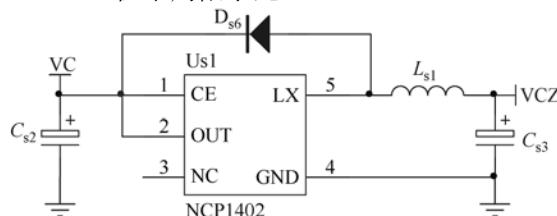


图 7 DC/DC 转换单元

2.7 硬件定时单元及电源输出控制单元

为了保证硬件定时单元及 MCU 单元工作的稳定性和可靠性，储能及电源管理单元后级采用 DC/DC 转换单元进行稳压输出。在设计硬件定时电路时，根据 MCU 单元稳定工作所需的电压来设计超级电容的充放电时间，使得硬件定时电路按设定要求输出高低电平。当硬件定时电路输出低电平时，电源输出控制单元处于导通状态，MCU 单元和射频收发单元启动并开始工作，此时超级电容处于放电状态；当硬件定时电路输出高电平时，电源输出控制单元处于截止状态，MCU 单元和射频收发单元停止工作，此时超级电容处于充电状态。

硬件定时电路采用 TLC555 定时器及相关外围电路设计，输出占空比为 90%，周期为 1min 的方波。当定时电路输出低电平给电源控制单元中的 MOS 管栅极时，MOS 管导通，给 MCU 单元、射频收发单元正常供电，于是 MCU 单元、射频收发单元启动并开始工作，单片机管脚输出使取能/采样切换单元切换到采样模式的控制信号；当定时电路输出高电平给电源控制单元中的 MOS 管栅极时，MOS 管截止，对 MCU 单元、射频收发单元停止供电，此时，取能/采样切换单元恢复到取能模式。

2.8 MCU 单元

MCU 单元采用低功耗单片机，并内置十六位精度的差分输入 AD 模块，采样精度得以保证，而且内置温度传感器。MCU 单元作为主控单元，主要完成取能/采样切换单元的控制、电流采样与保护单元的控制，以及射频收发单元的控制。

为了达到超低功耗的设计，MCU 单元采用间歇式工作方式，其工作流程为：起始阶段，取能/采样切换单元处于取能模式，超级电容处于充电状态，硬件定时单元输出的 PWM 控制信号为高电平，后

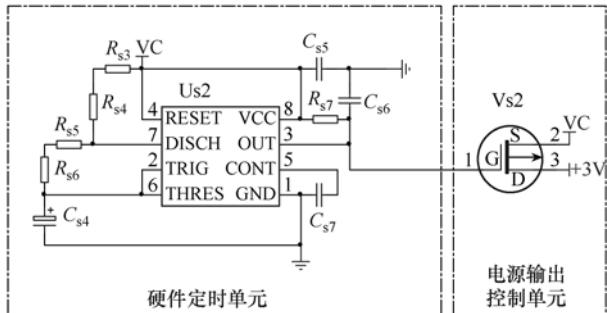


图 8 硬件定时单元及电源输出控制单元

级电源输出控制单元断开，MCU 单元处于不工作状态；当硬件定时单元输出的 PWM 控制信号变为低电平时，后级电源输出控制单元导通，MCU 单元启动并开始工作，通过其 I/O 口输出的 CRT 信号，控制取能/采样切换单元为采样模式，并完成采样工

作。随后 MCU 单元将传感到的数据经其内部处理之后发送给射频收发单元，再由射频收发单元来完成与后端射频收发设备的通信工作；当硬件定时单元输出的 PWM 控制信号再次变为高电平时，后级电源输出控制单元关断，MCU 单元停止工作，取能/采样切换单元恢复为取能模式并给超级电容充电。

2.9 射频收发单元

射频收发单元由 NRF905 射频芯片（但不局限于于此）及其外围电路组成，在发送阶段时，MCU 单元将需要发送的数据打包，通过 SPI 总线传给 NRF905，并由 NRF905 进行 GFSK 调制，最后以射频的方式发送给后端射频接收设备。在接收阶段时，NRF905 从后端射频发送设备接收数据，并通过 SPI 总线传给 MCU 单元，最后由 MCU 单元进行数据处理。

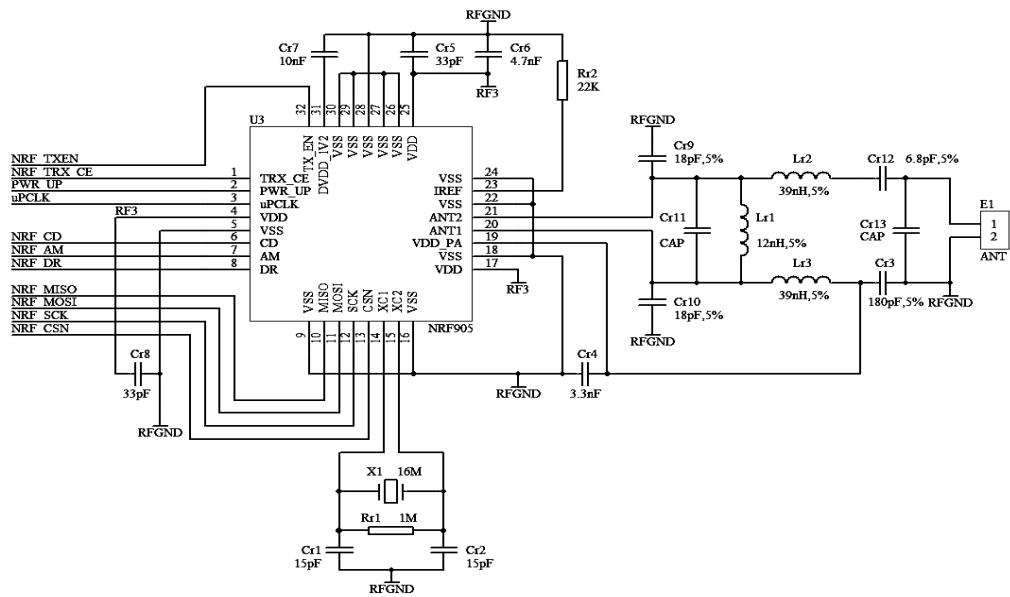


图 9 射频收发单元

3 结论

1) 与使用两个互感器来实现取能和电流感测的装置相比，本文的装置只使用一个互感器即完成了电流采样和取能，因此，重量、体积至少降低了一半，且更加的小巧轻便，方便安装。

2) 本装置采用超级电容储存提取的电能，并通过设计的配套保护电路，使本装置可以适应变化范围很宽的电流。此外，本装置还内置大容量锂电池作为备用，这样更好地提高了装置供电的稳定性和可靠性。

3) 在电路设计方面，除采用低功耗设计之外，本装置提供了一种间歇式工作设计，较目前绝大部分装置采用的连续工作模式，功耗更低。

参考文献

- [1] 祝永华, 叶文通. 输电线路杆塔在线监测系统供电电源的研究[J]. 黑龙江科技信息, 2015(20): 56-57.
- [2] 刘丰, 高迎霞, 毕卫红. 电子式电流互感器高压侧供能方案的研究[J]. 高电压技术, 2007, 33(7): 72-75.
- [3] 新沂润扬电子科技有限公司. 一种实用的锂电池涓流充电电路[P]. 中国: CN201420275480.8, 2014.
- [4] 吴猛. 电流互感器特性分析及应用[J]. 智能电网, 2014(11): 27-30.
- [5] DL/T 725—2013. 电力用电流互感器使用技术规范[S].

作者简介

侯克男 (1983-)，男，硕士研究生学历，工程师，主要研究方向为电力系统及其自动化、输配电及用电工程。