

探究智能低压塑壳断路器系统的硬件设计及可靠性

李亚团 段旭兵 刘炎鑫

平高集团智能电力科技有限公司

摘要：低压塑壳断路器作为一种对电网进行通断控制的开关装置，被广泛地应用于低压电网。开关作为电力系统的重要组成部分，对人类生产、生活等都具有重要意义。随着智能电网技术的发展，传统的开关已逐渐退出历史舞台，而新的智能化开关正处于开发与普及的阶段。智能开关相对于常规开关，其控制精度高、整定方便、可靠性高，在实现基础保护的同时，还可以进行数据采集，数据存储，参数设定，为实现配电网的智能化、信息化奠定了基础。

关键词：塑壳断路器；智能控制器；硬件设计；电磁兼容；PCB；Hyperlynx

【DOI】10.12252/j.issn.2096-627X.2023.05.072

低压塑壳断路器是一种接通和分断电路的开关电器，它广泛应用于用户端低压配电系统中的控制与保护。低压断路器产值占低压电器总产值50%以上，低压断路器在给人民的生活用电带来方便的同时，也为工业发展提供了动力。仿真随着智能电网的发展，配电网中电能的传输质量和安全问题日益突出，对电网的自动化管理、保护与控制提出了更高的要求。随着控制、微电子、传感、通讯等技术的不断发展与应用，以高性能微处理器为核心，将嵌入式、网络通信、软件等技术相结合的智能型塑料外壳断路器应运而生。该系统具有网络通讯，数据存储，参数设置，参数显示，遥控等功能。

一、项目背景

研究开发网络化低压智能化塑壳断路器，实现在线损耗的实时准确测量；内建遥控装置，支持数据采集和状态报警；使用智能型保护，可达到其基本保护及扩充保护、测量、控制及温度报警等功能，为用户提供了无人值班的基本保障。新一代的智能开关的产业化开发，可以对国网关于配电网的应用政策做出及时的回应，具有很大的潜力，可以在技术上为产品赢得一些市场优势。

二、国内外研究水平综述

目前已有施耐德，ABB，德力西，正泰等公司都已开发出自己独特的通用断路器智能化解决方案，但其适用范围广，难以规范化、系统化。以低压线路监测为基础，结合终端与交换体等技术，以融合终端为边界节点的理念，做好相应的技术储备，是迎接未来智能配电网的根本途径。

随着电力系统智能化水平的不断提升，对电力系统终端的开关装置提出了更高的智能要求。当前，正泰电器，天正电器，苏逸电器等在业内处于领导地位；以智芯等智能研发能力高的企业为主，这类产品的研发厂商并不多，其中大部分都是传统的断路器制造商，没有智能化的研发能力，也有一些是智能的，但没有开发传统

开关的能力。

通过混改，公司已经拥有了传统断路器的产能，并在此基础上，结合传统与智能两大技术优势，进行网络化、智能化的低压智能断路器的开发，有助于提高企业的市场竞争力。与此同时，智慧科技还需按照公司的战略规划，完成基于互联网的低压智能化塑壳断路器产品的研发，进军配电网物联网业务，为智能化台区的解决方案提供重要的产品支持。

三、智能断路器系统的特点和功能需求

（一）智能断路器系统的特点

智能断路器可以实现对电力系统各种参量的在线监控，其通断精确，通讯网络化，智能化程度高。在各种工艺的飞速发展下，其功能也得到了进一步的拓展与提高。与常规开关相比，它具有三大优势：

（1）具有较高的精确性。常规的断路器操作值不够准确，而智能断路器则是利用变压器收集每相的电压电流值，并将其与给定的值进行对比，从而向电子脱扣器发送指令，从而实现了高的控制精度。

（2）具有较强的实用性。它拥有大量的周边线路，具备预警、接地保护等多种性能，还具备网络通信，数据存储，数据显示，参数设定和遥控等功能，同时还具备了分区选择保护等多种作用。

（3）具有较高的可信度。常规的开关容易受到外界因素的干扰，而智能开关能够依据外界的信息和外界条件，精准地给出出分闸的动作，全部由命令进行，从而确保了合闸过程的正确、可靠。

（二）智能断路器系统具备的功能

（1）网络通信功能：PC机与智能开关之间可以实现通信，可以采用485通信模式、以太网模式、CAN总线模式以及Profibus模式等多种通信模式。其通讯的基本思想是：通过将所收集的数据、电能参数以及工作状态以通讯协议的形式传送到PC，由上位机来观察各种数据，并提供相应的控制信号，从而达到遥控的目的。

（2）测量、显示及存储功能：它可以测量，存

储, 显示, 查询配电网中的各种电气参数, 如电流, 电压, 有功, 无功, 功率因子等;

(3) 参数设置和整定功能: 保护动作电流及动作时间由智能断路器上的按钮及拨号键来设置并调节;

(4) 报警提示功能: 根据 LED灯的工作状况, 可以判断出电力系统的运行状况, 其中包括: 正常工作、预警报警、过载报警等。使用者可以依据自己的状况采取相应的行动, 防止设备损坏以及事故的发生;

(5) PC端监控软件: PC机的监视程序可以实现对开关设备的远程监视与控制, 其主要包括: 对电流、电压、功率和功率因子等参数进行实时的探测与诊断, 以及对故障数据的存储与查看, 以及分合闸指令的发送等。

四、智能塑壳断路器原理设计

(一) 最小系统设计

本课题选择STM32F107VCT6作为本系统的主控芯片, 对单片机的性能、功能以及丰富的外设接口进行了研究。

(二) 电源电路设计

该控制器的工作电源为自备电源和外接用电。按照相关国家标准的规定, 开关必须具有自生供电, 以受保护线的电能供给控制装置。自生供电是指在受保护线上经过变压器而产生的电流。开关自供电的精确、可靠是保障开关正常工作的一个重要因素。

四相电流变压器的副边电流整流叠加后, 产生一个直流电讯号, 经电容器储存后, 再由开关电源芯片LT1934将该电压讯号转换为5V、3.3V, 以供本系统使用; 在三相每一相均低于 $0.4I_n$ (I_n 为额定电流)的情况下, 由于自备电源无法满足系统的运行要求, 该电路会自动切换到外部用电来给系统供电, 从而确保控制器的持续运行。

(三) 信号采集与控制电路

1. 电流信号采集处理电路

为了对配电线路的运行状态进行监测, 必须对配电网中的A、B、C三相及N相电流进行监测。电流信号采集与处理电路的主要功能在于: 将电流互感器收集电网中A, B, C, N相的电流, 通过整流、滤波、运算, 然后将其输入到单片机的AD端口, 完成对数据的获取, MCU会按照所需的值, 再次下达相应的指令。

2. 电压信号采集处理电路

该智能开关除了对电流信号的采集之外, 还可以增加一个电压收集电路, 实现对配电网的保护, 从而进一步完善了其功能。该电压信号采集电路的功能在于: 利用电阻分压的方式, 对A, B, C三相及N相的电压信号进行采集, 并经叠加的放大电路对其进行处理, 并将其输入到单片机的AD采集接口中, MCU则按照对应的数值来发布相应的指令。

3. 脱扣控制电路

跳闸控制回路为智能型断路器的执行回路。因为J4连接到断路器主体的电磁体上, 所以在MCU发出跳闸命令TRIPPWR打开MOS管Q5时, 开启Q5就会带动电磁体动作, 切断断路器主体。R126作为泄放装置, 可避免因电流太大而造成MOS管的损伤; D16起到对电磁线圈的保护作用, 因为跳闸后, 线圈要放电, 所以D16和线圈组成了一个反向放电回路, 避免了线圈烧毁; 采用C69滤波器对跳闸信号进行滤波, 以避免因干扰而造成跳闸错误, 从而提高跳闸控制回路的稳定性。将OUTPOWER、OUTGND连接到外置的后备电源上, 以确保当自燃式电源不能正常工作的情况下, 系统仍然可以正常跳闸。

4. 远程控制输出电路

微型智能型塑料外壳断路器可实现人工开断, 然而, 大型智能化的塑壳式智能断路器, 其外部辅助设备是关键。电气操纵机构用于实现对断路器本体的远程操纵, 实现对开关的遥控。在此基础上, 提出了一种新型的电动执行器, 即电动机驱动型和电磁式执行器。本文提出了一种电气操纵遥控回路, 用于对电气操纵装置进行控制, 以达到遥控开关的目的。

ETRIP_ON是MCU输出的信号端子, 其初始电平是高电平, 在这种情况下, 该光电隔离器被设置为OFF, 在开关主体接通动作时, 上位机发送一个降低ETRIP_ON信号电平的命令, 接通该光电耦合器, 使得该继电器K1闭合, 由此该电动操作机构完成了合闸操作。

五、PCB设计及可靠性研究

(一) 控制器的元器件的封装和PCB布局

1. 控制器元器件的封装

确定了硬件电路的原理和芯片, 按照PCB的设计需求, 设定了芯片的封装尺寸, 管脚数量, 引脚数据, 再按照这些参数画出器件的封装库, 最终完成整个电路板的印制电路板。

2. 控制器元器件的布局

元件配置的优劣, 将会影响后续印刷电路板的导电率, 以及整个电路板整体性能。PCB的元件布置分为: 人工布置和自动化布置。人工布置是指通过人工放置元件的方法来布置, 而自动化布置是指EDA系统按照软件的指令来自动地布置设备。自动化布置有一些特点, 但是通常都不够精确。

将原图输入到电路板上以后, 就是要对每个元件进行布置了, 在布置时, 首先要明确电路板上的主要元件的位置, 再按照电路图, 将一个功能模块的元件放在电路板上的某个地方, 进行模块化布置。布局也要遵循从大到小, 从简单到复杂的顺序, 力求做到布局统一, 美观, 但更主要的是印制板具有更高的性能。在印制电路板的时候, 有以下几点需要注意:

(1) 对外形无特别要求时, 印刷电路板的外形最

好是长方形，并且一定要开有定位孔，这样才能确保印刷电路板的安装和固定，并确保电路板上各个功能模块的稳定工作。

(2) 分别布置：数模、高电压和低电压三个模块。

(3) 芯片的供电管脚应该与去耦电容器相连接，并尽可能地接近芯片的供电管脚。

(4) 将电路中的各功能模块排列在一起，使得信号从电路板的一端流到另一端，这样就不会互相影响了。

(二) PCB的电磁兼容性原则

1. 电磁干扰三要素

电磁干扰要达到干扰的目的，就必须具备三个因素：干扰源、耦合路径和接收体。一种装置或一种天然现象，其产生的电磁能被称作EMI；传播干扰能量的介质或通路叫作耦合通路；在接收EMI时，其性能下降的装置或装置被称为接收机。很多装置和装置都同时是EMI和接收器。

2. 电磁兼容问题控制技术

(1) 空间分离

空间隔离就是把有干扰的对象从空间上隔离开来，具体有：位置控制，方位控制，物体隔离等。在此基础上，提出了一种新型的电磁屏蔽方法——空间隔离法。提出了一种适用于低压回路的低压线路绝缘技术。另外，为了避免各模块之间的相互影响，在PCB的布线上也要遵循各个模块的原则，具体实例进行具体分析。

(2) 时间分离

一是在有用信号发射的情况下，将干扰信号的发射终止；二是在强烈的干扰信号发出的情况下，能将敏感的装置关掉，保护敏感的装置不会受到损害。时间分割的方式主要有：主动分割、被动分割和共时性等。

(3) 传输通道抑制

采用滤波，接地，屏蔽，搭接，配线等措施来消除传输信道。滤波是为了消除电线上的干扰；接地质量对整个电路板的电磁兼容性能有很大的影响。屏蔽能阻断太空中的辐射；合理的重叠、配线能有效地抑制EMI信道。采用磁珠、电容、共模抑制等方法，从传送信道的角度对其进行抑制。

(三) 智能断路器的可靠性研究

1. 电源设计

在智能控制器的设计中，电源的设计是一个重要的环节，因为它为整个电路中的各种有源元件供电，所以在设计电源的时候，应该让设计出来的电源是稳定、可靠、低功耗、高精度的。在设计电源电路的PCB时，应该考虑到如下问题：

(1) 电源的PCB设计要做到输入/输出均位于功率模组两侧，以避免输入与输出之间的干扰，也就是各讯

号流方向相同，改善了电源的抗干扰能力。

(2) 为避免外界冲击等信号对电源的干扰，在电源线输入端使用磁珠或屏蔽罩等装置。

(3) 为了保证电源的稳定输入，在其输入端子上通常要加10-100 μF 。

(4) 功率模块的印刷电路板设计要紧凑，由于功率模块含有高频信号，所以每条信号线都尽可能地缩短，并且与其他电路模块之间有一段距离。

通过以上说明，在该智能控制器中，给出了一种供电方案。

2. 接地设计

在印制电路板上，可采用多种接地方法：单点接地，多点接地，复合接地，浮接地。接地设计的基础原理是这样的：

(1) 为了减小对回路的干扰，使地回路的面积尽可能地减小。

(2) 数字接地和模拟接地要分开，不能重叠，当它们连接在一起的时候，要用磁铁或电感将它们隔开。

(3) 在印制电路板上存在多个接地面时，需在电路板上布置大量的通孔，利用这些通孔吸收电路板上的信号，减少电路板外部的辐射。

(4) 地线要尽量宽，最少要设三倍于一般信号线的宽度，以便减少地线上的电位差，改善系统的稳定。

智能开关控制电路的PCB为四层平板结构，在中间设有一层作为岩层，既能阻止地线构成环路，又能屏蔽来自信号层的辐射信号。

结论

本文对智能开关控制系统进行了一年多的研究，在此期间，通过不断地学习与实际操作，使我对智能开关的使用有了一定的认识和掌握。本文介绍了一种功能齐全，性能稳定，但仍有许多不足之处。随着测试技术的进步，对测试数据的检测与控制的准确性提出了更高的要求。智能断路器硬件上可进一步优化电路，使得数据获取更加精确，并可通过多CPU协作，提升计算精度与速度。此外，还需要改进PCB板的抗干扰能力，并对其进行热学、磁学等方面的分析，以满足更苛刻的工作条件。

参考文献

- [1] 高翔华. 高精度线偏振辐射计数据采集系统设计[J]. 安徽大学. 2016.
- [2] 李凯. 基于虚拟仪器的塑壳断路器寿命测试系统的设计与实现[J]. 苏州大学. 2017.
- [3] 易先君. 一种新型电子脱扣器的设计与实现[J]. 上海交通大学. 2015.
- [4] 赵晨铭. 12kV真空断路器性能分析及智能脱扣器设计[D]. 2021.
- [5] 马俊飞. 基于物联网技术的农机车联网系统的研究与实现[J]. 青岛理工大学. 2018.