

# FlexRay 总线在电力系统继电保护装置中的应用

牛志刚<sup>1</sup>, 肖昆<sup>1</sup>, 王建林<sup>2</sup>, 李黔<sup>3</sup>, 刘睿<sup>3</sup>, 梁荧<sup>3</sup>

(1. 上海电力学院电力与自动化工程学院, 上海 200090; 2. 艾木恩电力科技(上海)有限公司, 上海 200090;  
3. 四川省电力工业调整试验所, 四川 成都 610016)

**摘要:** 在电力系统继电保护装置内部, 采用 FlexRay 作为背板总线解决方案, 构建网络化硬件平台, 装置内的各模块作为 FlexRay 节点通过总线方式互连通信。根据保护装置内节点的不同功能需要, 提出了 FlexRay 通信节点的三种实现方案, 并讨论了 FlexRay 通信节点软硬件设计中的若干技术要点。以 FlexRay 总线构建的网络化硬件平台易于扩展, 可以优化继电保护装置硬件结构, 并有利于实现 IEC61850 标准下 IED 硬件结构的标准化和通用化。

**关键词:** FlexRay; 继电保护; 背板总线; 硬件平台

## Application of FlexRay in protective relay unit of electric power system

NIU Zhi-gang<sup>1</sup>, XIAO Kun<sup>1</sup>, WANG Jian-lin<sup>2</sup>, LI Qian<sup>3</sup>, LIU Rui<sup>3</sup>, LIANG Ying<sup>3</sup>

(1. School of Power and Automation Engineering, Shanghai Institute of Electric Power, Shanghai 200090, China;  
2. M&N Electric Power Technology (Shanghai) CO., Ltd, Shanghai 200090, China;  
3. Sichuan Electric Power Commission and Test Institute, Chengdu 610016, China)

**Abstract:** FlexRay is adopted as internal backboard bus solution for protective relay unit to construct a networking hardware platform in electric power system. Different modules in the unit can communicate with each other through the bus as FlexRay nodes. Three schemes are proposed for constructing a FlexRay node according to the different needs of its function, and some key technical points in the software and hardware design are discussed. The FlexRay-based networking hardware platform has flexible expansibility, can optimize the architecture of protective relay and avail to implement the standardization and generalization of hardware architecture of IEC61850-based IED.

**Key words:** FlexRay; protective relay; backboard bus; hardware platform

中图分类号: TM774 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2010)16-0073-05

## 0 引言

电力系统的继电保护装置是典型的实时控制系统。在传统的微机继电保护装置内部, 较多采用 CAN 总线<sup>[1]</sup>。随着电力系统的发展, 特别是数字化变电站的迅速推广, 对于保护、测控等智能电子设备 (IED) 的实时性和可靠性要求更为苛刻。电力系统对于继电保护装置性能要求在不断提高, CAN 总线所固有的缺陷已经逐步显现。当数据速率的要求超过 CAN 时, 往往不得不使用两条甚至多条 CAN 总线。在继电保护装置内部, 以 FlexRay<sup>[2]</sup>总线为骨干网, 构建网络化的硬件平台, 有利于软硬件设计的模块化和通用化, FlexRay 是继电保护装置内部一种理想的总线解决方案。

## 1 FlexRay 概述

FlexRay 是一种新型的高速串行总线标准, 与传统的 CAN 总线相比, FlexRay 在通信速率、确定性、可靠性等多方面都有着更为优越的性能<sup>[3-8]</sup>。

1) 传输速率高, 单通道可达 10 Mbps 双通道高达 20 Mbps; CAN 总线传输速率最高为 1 Mbps。

2) 支持双通道, 双通道可单独运行、并行运行或冗余运行; CAN 只有一个通道, 无冗余。

3) 支持最大数据帧长 254 字节; CAN 总线支持最长数据帧仅 8 字节。

4) MAC(Media Access Control)层采用 TDMA(时分多路)方式, 数据通信具有确定性; 而 CAN 总线采用带优先级的 CSMA/CA(冲突避免多路访问方式), 无法保证通信确定性。

5) 支持星型、总线型、混合型等多种拓扑结构; CAN 仅支持总线型拓扑。

基金项目: 上海市科委资助项目 (05DZ22305)

6) 配置灵活,一方面双通道的配置具有很大的灵活性,另一方面在 FlexRay 的通信周期中,动态段和标识窗 (Symbol Window) 可以根据需要取舍; CAN 总线配置灵活性相对较差。

FlexRay 的一个通信周期分为静态段 (Static Segment)、动态段 (Dynamic Segment)、标识窗 (Symbol Window) 和网络空闲时间 (Network Idle Time), FlexRay 的通信周期及时间结构如图 1 所示。FlexRay 的静态段采用的 TDMA 方式。静态段被划分为若干个时间宽度相同的静态时隙<sup>[2]</sup> (Static Slot), 每个时隙被分配给某个节点, 在该时隙内此节点唯一占有总线控制权, 向总线发送数据, 即使该节点此时没有数据需要向总线发送, 其所占用的时隙也不会被其它节点所占用。静态时隙的时间宽度以及节点访问总线的顺序在系统配置时确定, 系统运行中是固定的。与静态段不同, 动态段采用的是可伸缩时分多路方式 (Flexible-TDMA)<sup>[3]</sup>, 节点访问总线的顺序是按优先级确定的, 但时隙长度是动态调整的, 当节点没有数据需要向总线发送时, 经过一个微时隙 (Minislot) 后, 总线控制权立即交给下级节点。

可见, FlexRay 的静态段是时间触发 TT (Time Triggered) 方式, 动态段本质上是事件触发 ET (Event Triggered) 方式。TT 方式具有确定性, 但

实时性较差, 而 ET 方式的实时性较好, 但确定性差。FlexRay 采用 TT-ET 混合方式<sup>[4]</sup>, 很大程度上弥补了标准 TDMA 方式造成系统实时性较差的不足。

FlexRay 选用改进型 Welch-Lynch 同步算法, 通过频率校正与偏移校正相结合的校正方式, 在满足 FlexRay 协议规定的条件下, 同步精度可以达到 0.15~11.7  $\mu\text{s}$ <sup>[2]</sup>。当系统同步建立后, 系统在每个时隙内, 只有唯一的节点向总线发送数据, 因此节点间的数据不会发生冲突。

## 2 保护装置内部 FlexRay 组网方案

在保护装置内部, 可以将功能划分由多个独立板卡分别实现(如保护逻辑运算、通信协议转换等), 板卡之间通过背板总线相连。采用 FlexRay 作为继电保护装置内部的背板总线解决方案, 各板卡作为 FlexRay 的通信节点, 节点间通过 FlexRay 进行通信。在保护装置内部构建网络化的硬件平台, 以 FlexRay 总线作为保护内部各模块间互连和数据传送的方式, 这样既有利于实现微机保护装置软硬件的通用化、模块化, 同时有利于软件升级和系统扩展, 显著提高软硬件可靠性。

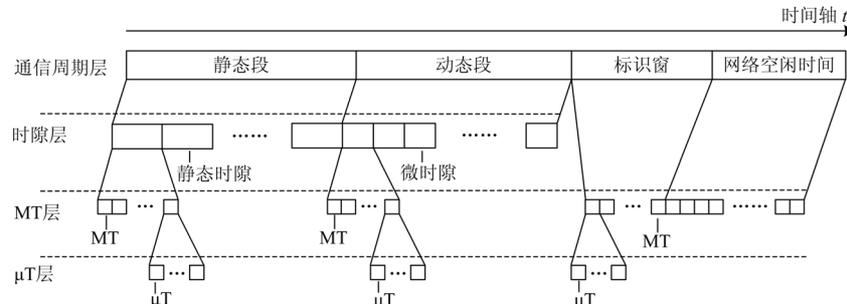


图 1 FlexRay 的通信周期及时间层次结构图

Fig.1 Communication cycle and time hierarchy of FlexRay

图 2 为保护装置内 FlexRay 总线的一种组网方案, 选用总线型拓扑结构连接多个 FlexRay 节点,

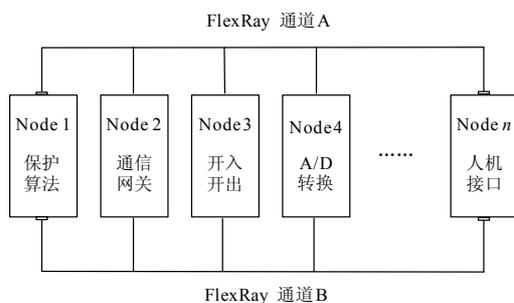


图 2 保护装置内 FlexRay 总线的组网方案

Fig.2 Internal net scheme of FlexRay in protective relay

AB 双通道, 冗余运行以增加通信可靠性。FlexRay 在总线型拓扑结构下支持的节点数目最多为 22 个, 节点间的最远通信距离为 24 m; 必要时可以通过有源星节点<sup>[9]</sup> (Active Star) 进行扩展, 完全可以满足保护装置内部对于节点数目及通信距离的需求。

## 3 保护装置内节点设计方案

图 3 为 FlexRay 通信节点的基本结构, 主要包括 MCU、FlexRay 通信控制器 (Communication Controller) 和总线驱动器 (Bus Driver)。其中 MCU 实现节点功能所需的数据处理; 通信控制器负责 FlexRay 协议的运行; 总线驱动器负责 FlexRay 物

理层信号的收发。

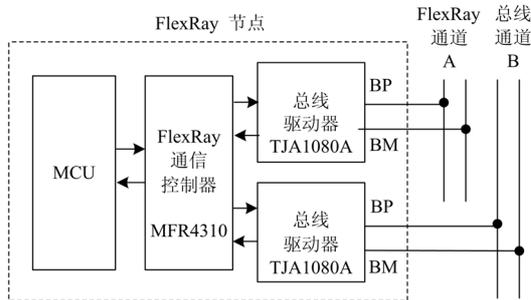


图 3 FlexRay 通信节点基本结构

Fig.3 Structure of FlexRay communication node

目前, Freescale 公司的一些型号 MCU 内部集成了 FlexRay 的通信控制器。选用集成的通信控制器,一方面可以简化硬件和软件设计;另一方面,集成的通信控制器总线不出芯片<sup>[1]</sup>,硬件电路的抗干扰性能很高,避免了采用独立通信控制器时地址总线和数据总线出芯片而造成系统整体可靠性下降;此外,集成的 FlexRay 通信控制器是 MCU 的内部资源,MCU 读写时需要的时钟周期少,而采用独立控制器时,通信控制器作为 MCU 的外部存储空间,MCU 在读写外部存储空间时要耗费额外的时钟周期<sup>[10]</sup>。因而采用集成的通信控制器有利于提高 FlexRay 节点的性能。

在继电保护装置内,不同功能的板卡作为节点通过 FlexRay 总线相连,其中执行一些核心功能板卡的运算量较大(如保护逻辑运算板卡、通信及网关板卡);而执行某些辅助功能的板卡(信号采集、I/O 模块)运算量相对较小。随着电力系统的数字化进程不断推进,对继电保护装置等传统二次控制装置的通信功能提出了更高的要求。根据当前电力系统对于保护装置的需求,并结合未来智能电子设备 IED 的发展方向,本文提出三种 FlexRay 节点的实现方案。

方案一选用 Freescale 公司的高性能的 32 位 MCU MPC5567,该型号 MCU 内部集成了 FlexRay 模块<sup>[11]</sup>。

方案二选用 Freescale 公司的 16 位 MCU MC9S12XF,该型号 MCU 带有协处理器 Xgate,并且内部集成了 FlexRay 模块<sup>[12]</sup>。

方案三选用 Freescale 公司的 16 位 MCU MC9S12XE<sup>[13]</sup>,并选用独立的 FlexRay 通信控制器 MFR4310<sup>[14]</sup>,MFR4310 符合 FlexRay V2.1A 标准。

以上三种方案中的总线驱动器都选用 NXP 公司的 TJA1080A<sup>[15]</sup>。TJA1080A 是全球第一款通过 FlexRay V2.1A 物理层一致性测试的总线驱动器。

此外 TJA1080A 还具有专门的总线监控(Bus Guardian)模块,可以对总线进行监控。

前两个方案都采用集成 FlexRay 通信控制器,其中方案一可用于保护装置内复杂功能(如通信功能)的节点,方案二可用于一般功能(如 I/O 功能)的节点。方案三采用独立的通信控制器,作为前两个方案的补充,用于阐述 MCU 与 FlexRay 通信控制器接口时的一些技术要点。

## 4 设计要点

### 4.1 硬件系统设计要点

根据 FlexRay 物理层协议要求<sup>[16]</sup>,总线驱动器 TJA1080A 与物理层接口的原理电路如图 4 所示,该接口设计适用于上节所提到的全部三种方案。其中 L1 为共模扼流器(Common Mode Chock),应满足在频率在 20 M~50 MHz 时,共模扼流器的共模衰率最大。图 4 中电阻 R13 与 R14 应选取精度较高的型号以保证二者良好匹配,其阻值应满足  $2|R13-R14|/(R13+R14) \leq 2\%$ ,匹配性过差会导致信号收发时产生很高的电磁辐射。

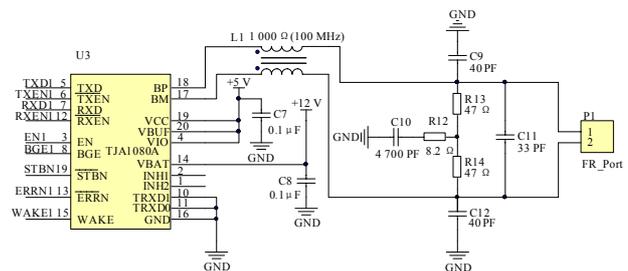


图 4 FlexRay 总线驱动器与物理层接口电路

Fig.4 Interface of FlexRay bus driver and physical layer

方案三中主要器件之间接口电路设计如图 5 所示。与方案一和方案二不同,方案三采用的是独立的通信控制器,MFR4310 与 MC9S12XE 接口时,前者必须选择 AMI (Asynchronous Memory Interface) 模式,通信时后者必须选择 NX (Normal Expanded) 模式<sup>[13-14]</sup>。AMI 方式时,一共有 12 根地址线和 16 根数据线,MCU 则必须带有 EBI 模块。MFR4310 通过 EBI 映射到 MC9S12XE 的外部地址空间,后者具有 4 个片选信号 CS[0:3],任何一个信号都可以用来使能 MFR4310,但必须和映射的地址范围相对应。本设计中使用的是 CS0,从而通信控制器 MFR4310 在所对应的 MCU 存储地址空间为 \$40\_0000 ~ \$7F\_FFFF。

### 4.2 FlexRay 总线的配置

#### 4.2.1 系统参数的配置

FlexRay 总线的系统参数根据确定方式的不同

可以分为两类。

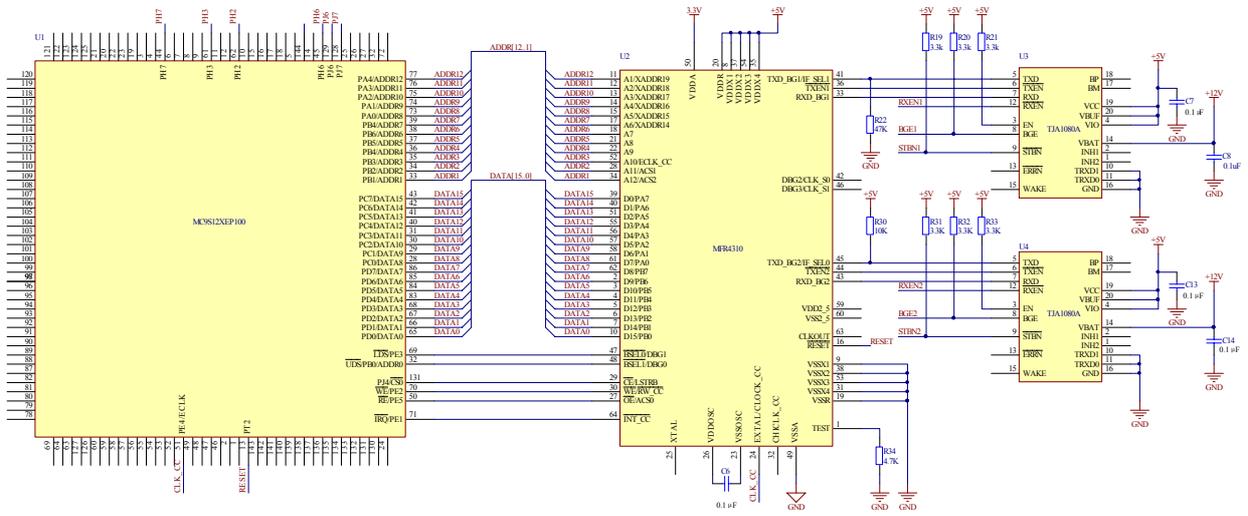


图 5 方案三中 FlexRay 节点主要器件接口电路

Fig.5 Interface of main devices of a FlexRay node in scheme III

第一类参数包括：通信周期；静态段、动态段、标识窗的时间宽度；MT (Macrotick) [2]的时长；同步节点的选择；单双通道选择；通信速率等；静态段时隙的分配；动态段的访问优先级等。这一类参数的主要依据电力系统对于继电保护装置的基本需求以及保护装置自身的功能要求而确定的，在系统设计的初级阶段就必须加以论证。如通信周期的确定，一方面继电保护作为实时控制系统，必须要保证电力系统发生故障时，继电保护装置必须在规定的时间内做出响应，其整组动作时间满足相关规程和标准要求[17-18]；另一方面，通信周期的确定也和

整个总线上的节点数目、节点数据量及数据帧的长短有关；此外通信周期还和通信速率、静态段动态段时隙分配策略等因素紧密相关；综合上述各因素在电力系统继电保护装置内，FlexRay 总线的通信周期一般在 5~8 ms 之间。

第二类参数包括：同步节点的总数目；冷启动尝试次数；时隙内发送数据的动作点偏移量 (Action Point Offset)；发送起始序列 TSS (Transmission Start Sequence) 位数等[2]；此类参数是与 FlexRay 总线的结构、硬件元件的性能、总线的通信速率相关，并由第一类参数而派生出来的。第二类参数的通常可以根据 FlexRay 协议规定建立列表对应关系或计算公式[2,16]。第二类的参数通常协议都规定了阈值限制，此类参数主要是为了保持 FlexRay 总线通信的正确性和合理性，和继电保护装置的自身功能的要求关联较小。

#### 4.2.2 节点参数的配置

与系统参数不同，FlexRay 的节点参数通常因节点的自身硬件特性不同而不同，节点参数决定了系统运行的可靠性和稳定性，节点参数也可以分为两类。

第一类参数包括：解码校正值；漂移阻尼因子；传输延时补偿；侦听超时时间；外部偏移校正值和外部频率校正值；关键时隙 (Key Slot) 以及其是否用于启动或同步等。这些参数在 FlexRay 的 SDL [2] 模型中采用的，通常是和 FlexRay 总线运行中的状态紧密相关。这一类参数的数值主要因节点在总线中所处的位置、节点硬件电路的性能参数不同而有所差异，但参数取值通常都有一定范围。

第二类参数包括： $\mu T$  的时长；MT 中  $\mu T$  个数；动态帧的有效数据长度；有源星节点的数目；总线驱动器的激活反应时间和空闲反应时间等。与第一类参数不同，这一类参数通常和 FlexRay 运行状态无关，主要由硬件结构以及物理层特性决定。

系统参数和节点参数的最终确定需要根据实际系统调试测试结果进行必要的优化。需要说明的是，对于方案三，MFR4310 按 AMI 方式与 MCU 连接后，首先要将前者映射到 MCU 的外部地址空间，如前所述，使用 CS0 管脚时，地址映射部分的代码如下。

```
#define MFR4310_BASE_ADDR 0x420000
#define MVR (* (volatile unsigned int *far)
(0x000+ MFR4310_BASE_ADDR)
#define MCR (* (volatile unsigned int *far)
```

```
(0x002+ MFR4310_BASE_ADDR)
#define STBSCR (* (volatile unsigned int *far)
(0x008+ MFR4310_BASE_ADDR)
#define MBDSR (* (volatile unsigned int *far)
(0x00C+ MFR4310_BASE_ADDR)
.....
#define MBFIDR127 (* (volatile unsigned int
*far) (0x4FC+ MFR4310_BASE_ADDR)
#define MBIDXR127 (* (volatile unsigned int
*far) (0x4FE+ MFR4310_BASE_ADDR)
```

## 5 结语

FlexRay 是新型的高速总线通信标准, 一些新的技术(例如总线驱动器中的比特整形功能)还将进一步提升 FlexRay 总线的通信性能。在电力系统继电保护装置内部采用 FlexRay 作为背板总线解决方案, 易于系统扩展和功能升级, 可以优化保护装置的硬件结构, 提升保护装置的整体性能, 满足当前电力系统对保护等控制装置日益严酷的实时性和可靠性要求。以 FlexRay 总线构建的网络化的硬件平台也有利于实现 IEC61850 标准框架下 IED 硬件结构的标准化和通用化。

## 参考文献

- [1] 杨奇逊, 刘建飞, 等. 现代微机保护技术的发展与分析[J]. 电力设备, 2003, 4 (5): 10-14.
- [2] FlexRay Consortium. FlexRay communications system protocol specification, Version 2.1, Revision A[EB/OL]. 2005. www.flexray.com
- [3] Mehdi Dehbashi, Vahid Lari, Seyed ghassem miremadi. Fault effects in FlexRay-Based networks with hybrid topology[C]. // Third International Conference on Availability, Reliability and Security, 2008. ARES 08. 2008: 491-496.
- [4] Pop T, Pop P, Eles P, et al. Timing analysis of the flexRay communication protocol real-time systems[C]. //18th Euromicro Conference. 2006: 11.
- [5] Sethna F, Stipidis E, Ali F H. What lessons can controller area networks learn from FlexRay[C]. //Vehicle Power and Propulsion Conference, '06. IEEE 6-8. 2006.
- [6] Heller C, Schalk J, Schneele S. Approaching the limits of FlexRay[C]. //NCA '08 Seventh IEEE International Symposium on Computing and Applications, 2008.
- [7] Paulitsch M, Hall B. FlexRay in aerospace and safety-sensitive systems[J]. Honeywell, Aerospace and Electronic Systems Magazine, IEEE. 2008: 4-13.
- [8] Hagiescu A, Bordoloi U D, Chakraborty S. Performance analysis of FlexRay-based ECU networks[C]. //Design Automation Conference, DAC '07. 44th ACM/IEEE. 2007: 284-289.
- [9] FlexRay Consortium. FlexRay communications system electrical physical layer specification Version 2.1, Revision B [EB/OL]. 2005 www.FlexRay.com
- [10] Freescale Semiconductors. Migrating from MFR4200 to MFR4310. Rev1. [EB/OL]. 2007. www.FlexRay.com
- [11] Freescale Semiconductors. MPC5567 microcontroller reference manual Rev.1.[EB/OL]. 2007-01. www.freescale.com
- [12] Freescale Semiconductors. MC9S12XF microcontroller reference manual Rev.1.15[EB/OL]. 2008-01. www.freescale.com
- [13] Freescale Semiconductors. MC9S12XE microcontroller reference manual Rev.1.19[EB/OL]. 2008-12. www.freescale.com
- [14] Freescale Semiconductors. MFR4310 FlexRay communication controllers reference manual Rev. 2 [EB/OL]. 2008. www.freescale.com
- [15] NXP Semiconductors. TJA1080A FlexRay transceiver preliminary data sheet Rev. 02. [EB/OL]. 2008-08 www.nxp.com
- [16] FlexRay Consortium. FlexRay communications system electrical physical layer specification, Version 2.1, Revision B[EB/OL]. 2005. www.flexray.com
- [17] GB/T 15145-2008 输电线路保护装置通用技术要求[S].
- [18] GB/T 14598. 300-2008 微机变压器保护装置通用技术要求[S].

收稿日期: 2009-09-18; 修回日期: 2009-10-24

作者简介:

牛志刚(1961-)男, 副教授, 长期从事继电保护与嵌入式技术的研究工作; E-mail: zhigangn@gmail.com

肖昆(1982-)男, 硕士研究生, 研究方向为继电保护与数字化变电站中的嵌入式技术;

王建林(1971-)男, 嵌入式工程师, 长期从事电力系统保护与控制领域的产品研发工作。