

基于电力电子标准模块的高速智能通讯网络拓扑

杭丽君, 胡海兵, 吕征宇, 钱照明

(浙江大学电力电子国家专业实验室, 浙江省 杭州市 310027)

Novel High Speed and Intelligent Communication Topology Based on PEBB for Power Electronic System Integration

HANG Li-jun, HU Hai-bing, LÜ Zheng-yu, QIAN Zhao-ming

(National Laboratory of Power Electronic (Zhejiang University), Hangzhou 310027, Zhejiang Province, China)

ABSTRACT: Nowadays, the universal control structure for digital control power converter does not fully utilize the merit of digital communication. Distributed communication structure with digital control is the developing trend of system integration with special power electronic application that features high system complexity and high power stage. Based on the analysis of the ring type communication structure, a type of intelligent communication structure with high speed for PEBB(power electronic building block) is presented in this paper. The prominent merit of the very structure is that data source for sending of every communication unit can be determined by its current state. Transmitting speed can be greatly improved by adopting the very structure, correspondingly, propagation delay can be reduced, that synchronous problem resulted by ring type structure adopted in power electronic high speed communication can be alleviated, moreover, the very structure greatly contributes to reduction of cost for fiber net. Finally, propagation delay between two adjacent nodes is presented by experimental result. According to capacity calculation, the very control system adapts to power electronic converter with high switching frequency as well.

KEY WORDS : system integration; power electronic system net; communication topology; digital signal processing; communication node

摘要: 目前, 通用数字控制功率变换器的控制结构尚未充分利用数字通讯的优点。分布式数字控制网络结构是复杂中大功率电力电子系统集成方向。该文从分析基本环状网络结构出发, 提出了一种基于电力电子模块(PEBB)的高速智能

通讯网络拓扑, 其最大优点是每个通讯单元的数据发送源可以根据该单元当前状态选择。该通讯网络可大大提高数据在网络上的传输速度, 减小传输延时, 可更好的解决电力电子高速通讯中由环形网络本身特性所带来的同步问题, 也对降低光纤通讯网络的成本起到极大促进作用。通过实验, 文章最后给出了每两个从节点间数据传输延时的时间, 可以得出该控制系统对于有较高开关频率要求的电力电子变换器同样适用。

关键词: 系统集成; 电力电子系统网络; 通讯拓扑; 数字信号处理; 通讯节点

0 引言

近年来, 软开关研究以及模块标准化研究是电力电子系统集成研究关注的热点^[1], 而复杂系统的标准化研究却依赖控制网络的标准化。以往运用于较复杂电力电子系统的控制系统, 基本都以集中式控制模式为主, 并都以此结构为标准控制结构。该方法尚未充分发挥数字控制和数字通讯的优点, 控制器同时处理内环和外环的控制。控制器的故障会使得整个系统进入瘫痪状态, 同时控制器必须进行维修或者更换, 因此使得系统不灵活, 冗余性能差。同时, 为了升级主功率系统, 例如功率等级等, 常常需要对功率模块的接口和参数测试单元进行重新设计, 因此导致重复劳动的后果。此外, 由于电压电流反馈回路和状态反馈信号(如噪声, 连接点故障等)易受干扰, 使得故障诊断的可靠性降低。为了增加控制系统的灵活性和可再利用性, 适用于电力电子分布式控制的集成控制模块和综合完整的控制方案^[2]是近几年国内外众多电力电子专家的重点研究

基金项目: 国家自然科学基金项目(50237030ZD)。

Project supported by National Natural Science Foundation of China (50237030ZD).

对象和高功率电力电子系统的发展趋势。

对于较复杂功率变换器控制^[3-4]，传统的控制系统使用点对点的连接方式。通常，数字信号处理器根据接收到的电压电流值计算占空比，把数据送到可编程逻辑器件 PLD(CPLD 或者 FPGA)^[5]，由该器件生成 PWM 信号并通过驱动送到每个开关管的门级。近来，一种新兴的带有菊花链结构的模块化的相桥拓扑备受关注^[6]。该拓扑降低了成本，并且可以采用新兴前沿的传输媒质。但是，该环形通讯网络结构拓扑除了上述优点之外，还有它本身网络特性所带来的致命弱点，即整个网络将会有累积延时存在。

本文通过对网络结构的分析，对传输延时给功率变换器所造成的影响进行了研究。缩短每个通讯控制模块的传输延时是解决网络延时所带来的问题的根本方法，也是进一步促进电力电子系统集成研究的关键所在，并且可以大大降低成本。本文提出了一种智能的通讯网络拓扑结构，该结构是以光纤为传输媒质，以节点作为通讯单元，其突出优点是每个节点的发送数据源可以根据控制器的当前状态进行选择。该通讯网络可以大大提高数据在网络上的传输速度，从而减小传输延时，可以更好的解决电力电子高速通讯中由环形网络本身特性所带来的同步问题，也对降低光纤通讯网络的成本起到了极大的促进作用。通过实验，文章最后给出了每两个从节点间数据传输延时的时间。通过通道容量计算，可以得出此控制系统对于有较高开关频率要求的电力电子变换器一样适用，同时可以满足有较快动态响应要求的应用场合，因此扩大了该通讯网络的应用范围。

1 基于 PEBB 的分布式控制结构及各管理层的任务

实现电力电子的分布式控制是复杂电力电子系统的发展方向，分层控制结构是众多国内外专家学者的研究重点。考虑到电力电子系统在工业现场的应用和工业控制系统的互联性特性，以及系统的独立性和即插即用的热插拔需求，一般电力电子控制系统分成 3 层：硬件管理层，应用管理层和系统管理层^[7]。不同管理层，采用不同控制器，不同管理层之间根据管理层的内容(即数据处理速度)需要不同带宽的通讯网络。显而易见，和主电路层关系紧密的控制器要求有较快的处理速度，与其他控制层

比较，该层的数据通讯速率最高。

工业界根据用户对电力电子系统体积小，容量大和智能化的需求，追求开关电源的高频化与模块化^[8-10]，因此系统集成是电力电子的发展方向。为了适应电力电子的发展方向，增加电力电子应用系统的灵活性是必然趋势，因此针对复杂中大功率的电力电子控制系统的底层通讯网络的研究是解决问题的关键所在。高容量的通讯网络可以满足开关电源的高频化和智能化的需求，同时可以使得系统的控制更加灵活，增加系统的冗余性。更进一步，通过通讯协议的定义和控制软件的模块化可以大大减少系统和软件的重复设计，实现系统智能化和即插即用性^[11-12]。

针对管理分层的电力电子控制系统，Ivana Milosavljevic 等提出了一个适合于点对点的高速串行通讯环形网络结构，通常称为菊花链环形网络，用于硬件管理器和应用管理器之间的通讯。该环形网络把系统分为应用控制层和硬件控制层，两层控制器都作为网络通讯节点，此外为了提高网络的抗干扰性能，以光纤为通讯媒质。网络中应用管理器和硬件管理器分别定义为主节点和从节点，此两类节点的数量根据系统的复杂程度和需求来确定，对于复杂系统可以采用多主节点系统，如图 1 所示。每个单相为一个半桥的三相桥系统的控制框图，此系统采用菊花链环形网络，每个桥臂的控制器定义为硬件控制器，作为网络的从节点，而系统的应用控制器则作为网络的主节点。实际上，作为网络的节点，从节点和主节点是等价的，从节点和主节点的功能是根据管理功能的不同进行区分的。

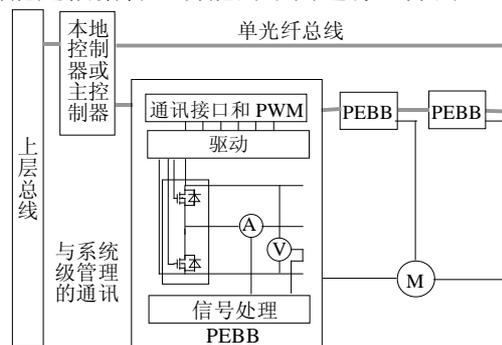


图 1 基于 PEBB 的三相分布式控制系统

Fig. 1 Distributed control system of three-phase inverter based on PEBB

根据分层控制的系统管理模式，不同级别的控制器实现的控制功能将有所区分。电力电子系统集成需要构建智能 PEBB 模块，单从节点(即硬件管理器)需要能够实现模块的基本运行功能以及和其他

模块节点之间的通讯协调。其基本功能包括 PEBB 的集成电压、电流和温度的测试, 提供内环电压和电流的控制, 对每相的上下管提供隔离的门级驱动, 开关频率的可调性控制, 电流和温度故障检测, PWM 相同步控制, 基于通讯协议的每个节点的 ID 分配, 模拟过流保护, PWM 驱动波形及其死驱的生成, 并联系节点数的可扩展性, 生成系统全局码, 包括关机和同步操作, 隔离电压测量, 进行输出电压调节或者过压保护^[13]。模拟采样电流在控制板上通过 A/D 转换模块转换成数字量, 储存主控制器所需的变量。系统中的主节点需要执行以下任务: 向从节点发送命令帧, 数据帧和同步帧信息; 接收从节点采样值(电压、电流、温度以及诸如相位、频率、故障信息等模块状态), 根据反馈信息执行外环控制算法, 给从节点发送模块操作指令, 如 PWM 频率和占空比信息等, 此外还须向从控制模块发送诸如同步运行等帧信息。主节点(即应用管理器)是底层 PEBB 和其余工业现场网络通讯的媒体, 通过该控制器可以把电力电子系统融入到工业现场中, 提供人机界面, 提高系统的易操作性。此网络的升级, 要求主节点和从节点的输入和输出必须是标准通讯接口, 因此 PEBB 提供给整个网络的数据升级到只有数字信号的信息流^[14]。为了增强高压隔离性能和对 EMI 的抗干扰能力, 通讯接口一般采用光纤物理层。在众多工业现场领域, 低成本光纤已经得到广泛应用。此外, A/D 转换时间是限制系统处理速度和提高系统开关频率的瓶颈, 为实现系统快速的瞬态响应和校正参考值, A/D 转换时间需要足够短。

2 电力电子系统通讯网络(PES Net)带宽要求

由于开关电源追求高开关频率和快速的动态响应, 因此高速的通讯网络是构建智能电力电子标准模块必备条件。中大功率电力电子系统集成信息流标准化可以分为如下 2 种情况:

(1) 中功率电源模块(主要是 DC/DC 与 AC/DC)。特点: 开关频率高、系统复杂度低。

数字化难点: 并联工作的信道速率很高, 占据数字通讯的资源量大。如通讯电源系统等。

(2) 中、大功率复杂模块(如 DC/AC、AC/AC)。特点: 开关频率低、系统复杂度高。

数字化难点: 系统控制的量比较多, 结构比较复杂。例如六相变频调速控制系统等。

下面根据系统开关频率来估算网络通道容量。

每个开关周期, 假定主节点执行的控制算法需要每个模块的电压和电流反馈值, 通讯网络需要的通道容量 C , 可以近似为

$$C = N_{\text{var/node}} \cdot n_n \cdot n_b \cdot f_{\text{sw}} \cdot (1 + k_{\text{oh}}) \quad (1)$$

式中: C 为通道容量; n_n 为系统从节点个数; n_b 为每个字长的位数; f_{sw} 为系统开关频率; k_{oh} 为伴随每个数据帧发送的帧头数据位(一般取 50%); $N_{\text{var/node}}$ 为每个节点需要传送的变量个数。

通常, A/D 转换器的精度为 8~12 位。最小的通道容量, 假定以一个简单的三相系统为标准, 3 个从节点, 每个节点需要 3 个变量, 8 位数据精度和 10K 的开关频率。设定 50% 的帧头数据位, 可以得到 C 的最小数据容量为 1.44M/s。涉及到较复杂的系统, 如六相变频调速系统, 假定每个节点 10 个变量, 一共 6 个节点, 12 位的精度, 开关频率为 50K, 同样的帧头数据位, 可得所需通讯数据带宽为 54Mb/s。

基于上述分析, 通道带宽至少 1.5Mb/s, 但这样的通讯系统使用场合非常狭小。100Mb/s 的通讯能力将使系统的设计更加灵活, 可以应用于多种不同需求的场合。

环形网络拓扑将各节点通过揽线连成一个封闭的环形, 不需要终结器, 数据信号沿着环单向传播, 依次通过每个节点, 控制简单, 信道利用率高, 通信电缆长度短, 不存在数据冲突问题。在局域网中应用较广泛, 容易安装和监控, 但容量有限, 网络建成后, 难以增加新的站点。由于数据信号是依次通过每一节点, 所以原始环形网络中的任何控制节点发生故障都会影响整个网络的正常工作, 这也是环形网络的致命弱点。环形结构的网络拓扑如图 2 所示。由于菊花链环型网络的信息发送模式为点对点, 所以不同位置的从节点接收主节点的信息必定存在不同传输延时, 但是对于诸如三相系统的逆变器和整流器, 若每个相桥模块的同步运行特性比较差, 则系统无法按照预期功能进行工作, 即无法实现预期的控制算法, 因此在每个通讯周期, 主节点除了发送从节点所需数据之外, 还必须保证每个模块的同步运行, 以确保整个系统按照主控制器的控制算法运行。如网络能够提供比根据式(1)所计算得到的更高带宽, 则能够增加系统设计的灵活性, 使得通讯协议更加完善, 确保系统的正常运行。在受到现有网络资源限制的前提下, 通过合理配置网络节点的发送和接收顺序可以减少数据通讯的时间,

通过数据的编码和解码以及网络拓扑的改进可以使得系统的通讯周期大大缩短。

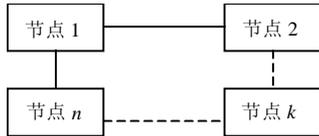


图 2 菊花链环形网络拓扑

Fig. 2 Daisy-chained ring type communication topology net topology

3 FDDI 标准的电力电子光纤环网结构

环形网典型实例有 IBM 令牌环(token ring)网, 剑桥环(cambridge ring)网, 以及 FDDI(fiber distributed data interface)结构。FDDI 结构是采用光纤作为传输媒体的高速通用令牌环网, 常用于高速局域网 HSLN 和城域网 MAN 中。环形网的缺点是对节点接口和传输线的要求较高, 一旦接口发生故障可能导致整个网络无法正常工作。FDDI 标准的光纤环网结构如图 3 所示。该结构是典型的环形网络结构, 信号在每个节点的传输路径为光纤的光-电信号转换, 串行-并行转换, 硬件管理控制器, 并行-串行, 电信号-光信号的转换。从式(1)可以看出数据通道容量和开关频率成正比。依据该网络的拓扑结构, 由上文可知为了满足快速动态响应要求, 每个开关周期需要一组通讯数据量, 因此开关周期可定义为通讯周期。一个通讯周期内, 除了需要数据发送和接收时间(等于通道容量), 数据传输延时和控制器处理所接收数据并重新计算占空比也需要占据时间。相对于上述提到的传输所占据的延时时间, 信号在光纤媒质上的传输所占据时间可以忽略。

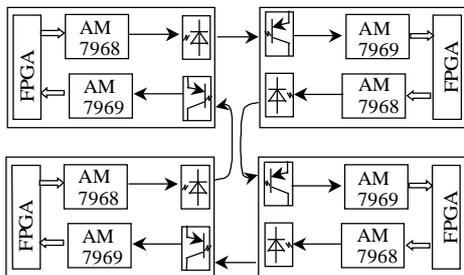


图 3 原环形光纤通讯网络拓扑

Fig. 3 Original ring type communication topology based on fiber media

本文提出了一种智能的改进的 FDDI 标准的通讯网络拓扑, 如图 4 所示。该网络和旧网络拓扑节点的光纤转换器的发送信号源由开关控制, 即可以直接来自本节点的接收光纤转换器或者直接来自本节点的并-串发送芯片。

(1) 命令帧: 主发从收。

命令标识符

(2) 数据帧: 主发从收和从发主收。

数据标识符 | 地址域 | 数据域(6 个字长) | 校验码

(3) 同步帧: 主发从收。

同步标识符 | 地址域(n) | 地址域(n-1) | ... | 地址域(1)

表 1 列出了根据系统需求所定义的 3 类数据帧的数据类型的长度, 其中数据帧地址域长度为 8, 高 4 位为多主节点地址预留, 低 4 位定义为从节点地址, 系统最多可以包含 16 个从节点。数据域包含多个不同类型的数据, 如实时采样电压和电流, 非实时的温度, 故障和模块的运行状态, 预留一个字节。目前 A/D 的数据采样一般以 12 位定义。同步地址域, 高 4 位同样为接收同步信息的从节点地址, 低 4 位为同步补充信息, 即传输延时的补偿信息。

表 1 信息流数据长度定义

Tab. 1 Definition of information dataflow

信息格式(帧)内容	长度定义	
	数据位数(bits)	
命令标识符	4(可发送 16 种命令)	
数据标识符	4	
数据帧地址域	8(其中高 4 位为高主节点预留,低 4 位为从节点地址)	
数据域	12	
校验码	16	
同步标识符	4	
同步帧地址域	8(其中高四位为从节点地址,低四位为补充信息)	

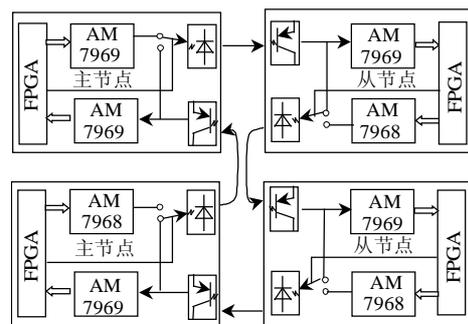


图 4 智能光纤通讯网络拓扑

Fig. 4 Novel intelligent communication topology based on fiber media

下面重点描述各类数据帧通过该智能网络的收发模式。系统启动, 主节点光纤发送转换器的数据源由控制器给定, 各从节点控制器将本节点的光纤发送数据源默认定义为本节点的接收光纤转换器。系统主节点可以发送 16 个不同的命令帧, 定义命令如下: ①数据标识符; ②网络同步标识符; ③关机标识符; ④开机标识符; ⑤主机复位标识符; ⑥AM7968 和 AM7969 执行同步命令; ⑦通讯中断指示(无光信号进入光纤)。

命令帧由主节点发送到从节点, 当该帧经过光纤接收器到达从节点时, 该数据帧通过 2 个通道分

别到达每个节点的控制器和光纤发送转换器。和原通讯网络拓扑作对比,数据到达下一个从节点时无需经过上个节点的串一并,并一串转换器以及节点控制器,而是直接从光纤发送转换器串行传输到下一个节点,数据传输延时可以大大减小,节省了传输时间,因此可以大大缩短通讯周期。主节点发送数据帧,网络开关仍按照原方向确定信息源。数据帧包含内容前文已经提到,此处不再重复。从节点控制器接收到数据信号后,根据同步信息产生 PWM 信号。主节点发送同步序列帧,由于同步序列的收发模式和上述模式一样,所以同步序列的传输延时大大缩小。如图 5 所示,以主节点发送同步帧指令为例,比较了原通讯网络和本文新提出的智能通讯网络各个从节点接收到同步指令的延时。图 5(a)为原通讯网络各从节点接收同步命令的模式,图 5(b)为智能通讯网络各从节点接收同步命令的模式。图 5(a)中原网络拓扑最后一个接收节点的同步序列地址放在整个同步序列的第一个发送位置,以此来缓解传输延时。图 5(b)中采用的新的网络结构也可以通过此方法使得每个节点的传输滞后现象得到缓解。通过该网络拓扑,数据在网络中的传输延时大大缩减,提高了系统的带宽,通讯周期大大减小,系统开关频率和动态响应都能够得到相应得大幅度提高,扩大了通讯网络应用场合,大大减小了由于开关频率限制所带来的影响。

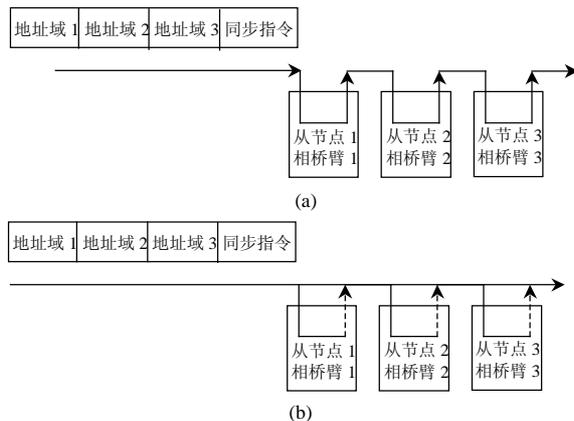


图 5 三相系统的环同步命令接收延时比较

Fig. 5 Comparison of synchronous command receiving delay for three phase system

图 5(a)中的系统,同步指令和地址域在到达其相对应的从节点时必须经过该从节点之前的从节点,因此对每个接收节点来说,在主节点发送指令之后到该节点接收到该指令,存在其前面节点接收和发送的延时,其与主节点距离越远,则相应延时也越长。而图 5(b)中的系统,当主节点发送指令给

接收节点时,数据始终在光纤的环形网络路径中,数据到达目标节点时不需要经过其前面节点的接收和发送。因此两个网络比较,显然,新网络的节点接收到主节点发送数据的延时要比原网络小的多。当主节点需要从某从节点采集数据时,该从节点控制器将该节点的光纤发送转换器数据源切换为控制器。系统网路可以构建双环和单环,单环网络信息流只能在单方向上流动,但是双环网络的成本要高的多,每个节点需要两个发送和接收转换器。此网络通过灵活选择节点光纤发送转换器的数据源,同样较大缩短了主节点作为应用控制器时的传输延时。

4 实验数据及系统传输延时分析

根据以上的分析,构建了基于光纤媒质的环形网络。网络每个节点都分别包括并一串信号发送芯片和串一并信号接收芯片,即 TAXIchip™的异步发送器 AM7968 和异步接收器 AM7969,该芯片和光纤数据通讯接口简单。每个节点包含一个光纤接收器和一个光纤发送器。TAXIchip™系列芯片可配置最高数据传输速率为 140Mbps,光纤发送器和接收器采用安捷伦的通讯速率为 125Mbps 的器件,发送器型号为 HFBR-1527,接收器型号为 HFBR-2526。此外,节点通讯控制器采用 Altera 的 Cyclone™系列 FPGA,该设备作为所有从节点和主节点的数据发送和接收的控制器。图 6 为上述实验通讯系统的实验波形。图 6(a)和(b)分别为光纤发送器信号发送端和光纤接收器信号接收端波形,发送芯片和接收芯片配置为 NRZI 的 4B/5B 编码和解码工作模式。由于两路信号测量非同时进行,因此不能体现一一对应关系。此外,芯片可以通过配置为同步工作模式,进行数据发送和接收的同步协调,从而减少数据的误码和丢失。测试通讯速率时每发送 10 个数据,中间发送一个同步信号,以减小通讯出错的几率。图中逻辑“1”表示有信号发送,逻辑“0”表示无信号发送。光纤收发器为 Pseudo-ECL(emitter-coupled-logic)标准的差分串行 I/O 高速信号,抗干扰能力强。此外,芯片支持 FDDI (fiber distributed data interface)标准的光纤信号通讯接口。图中波形经过差分放大和调制电路得到。图 6(c)所示为主节点发送芯片 STRB 信号和相邻从节点接收芯片 DSTRB 信号。STRB(输入信号)的一次上升沿信号指示芯片并行数据或并行命令端口的信号被发送器

输入锁存器锁存。信号经过锁存器由芯片编码成为串行信号,该信号以 100Mbps 的串行速率被芯片发送。芯片每发送 10 个数据后工作在同步模式,协调和接受器的同步操作。图中 2 通道为 DSTRB 信号,每一次上升沿信号指示在接受芯片的数据或者命令并行输出接口接收到新的数据。从图中可以看到 2 个信号的延时约 560ns,图 6 (d)为相应节点的发送器并行数据口数据和接收器并行口数据。从图中可以看到,接收数据相对于发送数据的延时约为 500ns。由于接收器 DSTRB 信号在并行口接收到数据以后出现上升沿,因此 DSTRB 信号的延时比接收到的数据的延时长。图 6 (e)为主节点发送器和第 3 个从节点接收器的延时比较,该延时约为 560ns,发送器和接收器相隔一个节点。因此每增加一个节点增加的系统的延时约为 60ns,可以推测对于三相系统(即有 3 个从节点的通讯系统),最后一个从节点接收到主节点发送的信息将会延时约 620ns。环形网络的延时被大大缩短,实验证实了新网络的优点。系统的仿真发现,只要整个网络延时不超过系统开关周期的 4%,系统的三相逆变输出波形不会出现畸变。因此,系统开关频率需要满足下面式子,系统可以正常工作^[15]:

$$t_d(n-1) < T_{sw} 4\%$$

其中, t_d 为 2 个相邻节点之间的传输延时; T_{sw} 为系统的开关周期。那么允许系统开关频率为

$$f_{sw} < \frac{1}{25(n-1)t_d}$$

参考简单三相系统为标准,按照每相邻两个节点的延时为 600ns 计算,可以得到系统的最大开关频率为 3.3M。因此采用该网路,系统的灵活性很大,可以大大增加控制实时性,满足高速系统的要求。

从实验结果可以看到,第 2 个接收节点比第一个接收节点延时约只有 60ns,因此每 2 个节点之间的通讯,其传输时间主要损耗在并一串信号发送器 AM7968 以及串一并信号接收器 AM7969。造成发送节点到 2 个接收节点的传输时间之差的主要原因是 2 个接收节点的光纤传输距离差(从光纤发送器到接收器,光纤的长度为 1.5m)以及信号在到达第 2 个接收节点前在第 1 个接收节点上需要经过一部分信号调制器件。系统运行,当主节点发送开关信息时,每个接收从节点的相互之间的延时,是影响系统响应实时性以及系统同步性能的关键。由以上分析可以得知,每个从节点相对于上个从节点的接收

信息延时约 60ns,假如系统的通讯协议包含同步帧,则同步帧在到达每个从节点时时间差约为 60ns。原通讯网落结构,每个从节点接收到主节点发送信息前,信号都要经过前一个节点的串一并接收器以及串一并的发送器,即每个从节点接收到主节点信号之间的延时约为 560ns。由此看出,新的智能通讯网络拓扑的信号传输的实时性要优越得多,新的网络更适合应用于电力电子系统集成智能标准模块之间的通讯。

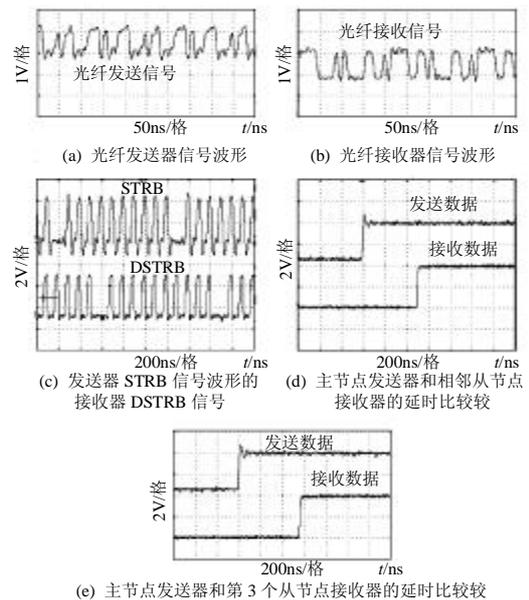


图 6 实验波形

Fig. 6 Experimental waveform

5 结论

电力电子系统实时性高,要构建智能标准模块,需要高速的通讯网络与之相匹配。本文从分析基本的环状网络结构出发,提出了一种基于电力电子模块(PEBB)的高速智能通讯网络拓扑,该拓扑的最大优点是每个通讯单元的数据发送源可以根据该单元的当前状态进行选择。该通讯网络可以大大提高数据在网络上的传输速度,从而减小传输延时,可以更好的解决电力电子高速通讯中由环形网络本身特性所带来的同步问题,也对降低光纤通讯网络的成本起到了极大的促进作用。

参考文献

- [1] 胡宗波, 张波, 邓卫华. PWM直流变流器中一种新型的零电压零电流转换软开关单元[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(3): 126-134. Hu Zongbo, Zhang Bo, Deng Wei-hua. Novel zvcct soft-switching cell in PWM DC-DC converter[J]. Proceedings of CSEE, 2004, 24(3): 126-134(in Chinese).

- [2] 姚文熙, 吕征宇, 费万民, 等. 一种新的三电平中点电位滞环控制法[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(7): 92-96.
Yao Wenxi, Lu Zhengyu, Fei Wanmin, et al. A new three-level neutral point potential hysteresis-band control[J]. Proceedings of CSEE, 2005, 25(7): 92-96(in Chinese).
- [3] 费万民, 吕征宇, 姚文熙. 三电平逆变器特定谐波消除脉宽调制方法的研究[J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(9): 11-15.
Fei Wanmin, Lv Zhengyu, Yao Wenxi. Research on selected harmonic elimination pwm technique applicable to three-level voltage inverters [J]. Proceedings of CSEE, 2003, 23(9): 11-15(in Chinese).
- [4] 孙俊忠, 马伟明, 杨青, 等. 六相交流同时供电发电机直流侧突然短路电流分析[J]. 中国电机工程学报, 2001, 21(12): 16-20.
Sun Junzhong, Ma Weiming, Yang Qing, et al. Study on the currents of sudden dc-side short circuit of six-phase synchronous generators with simultaneous ac and bridge rectified dc output[J]. Proceedings of CSEE, 2001, 21(12): 16-20(in Chinese).
- [5] Malapelle P L G, Torri G, Moruzzi R, et al. A new, modular, programmable, high speed digital control for large drives[C]. IEEE IECON 20th International Conference on Industrial Electronics, Control and Instrumentation, Bologna, Italy, 1994.
- [6] Kun Xing. Modeling, analysis, and design of distributed power electronics system based on building block concept[D]. Ph. D. Dissertation, Virginia Polytechnic Institute and State University, Blacksburg, Orlando, USA, 1999.
- [7] Bassi E, Benzi F, Lusetti L, et al. Communication Protocols for Electrical Drives[C]. IEEE IECON Proceedings, Orlando, USA, 1995.
- [8] du Toit, J A, le Roux A D, Enslin J H R. An integrated controller module for distributed control of power electronics[C]. Applied Power Electronics Conference and Exposition, 1998. APEC '98. Conference Proceedings 1998, Thirteenth Annual Volume 2, 1998.
- [9] Celanovic I, Milosavljevic I, Boroyevich D, et al. A new distributed controller for the next generation power electronics building blocks[C]. IEEE APEC Proceedings, New Orleans, LA, USA, 2000.
- [10] J A Du Toit, A D Le Roux, J H R Enslin. An integrated controller module for distributed control of power electronics[C]. IEEE APEC' 98 Proceedings, New Orleans, LA, USA, 1998.
- [11] Ericson T. Open plug and play power architectures simplifies system integration[M]. PCIM Magazine, 2000.
- [12] Jinghong Guo, Celanovic I, Boroyevich D. Distributed software architecture of PEBB-based plug and play power electronics systems [C]. Applied Power Electronics Conference and Exposition, 2001. APEC 2001. Sixteenth Annual IEEE Volume 2, 4-8 March 2001 Page(s) : 772 - 777 Vol.2 Digital Object Identifier 10. 1109/APEC. 2001.
- [13] Wu J, Dai H, Xing K, et al. Implementation of a ZCT Soft Switching Technique in a 100 kW PEBB Based Three-Phase PFC Rectifier [C]. IEEE PESC Conference Proceedings, South Carolina, USA, 1999.
- [14] Jinghong Guo, Edwards S H, Boroyevich D. Implementing dataflow-based control software for power electronics systems[R]. Computers in Power Electronics, 2002. Proceedings. 2002 IEEE Workshop on 3-4 June 2002 Page(s) : 65-70 Digital Object Identifier 10. 1109/CIPE. 2002. 1196717.
- [15] Milosavljevic I, Zhihong Ye, Boroyevich D, et al. Analysis of converter operation with phase-leg control in daisy-chained or ring-type structure[C]. Power Electronics Specialists Conference, 1999. PESC 99. 30th Annual IEEE Volume 2, South Carolina, USA, 1999.

收稿日期: 2006-05-02。

作者简介:

杭丽君(1979—), 女, 博士研究生, 研究方向为电力电子系统集成及其 DSP 控制, leejean_Hang@hotmail.com;

吕征宇(1957—), 男, 教授, 博士生导师, 研究方向为电力电子功率变换与系统控制;

钱照明(1939—), 男, 教授, 博士生导师, 研究方向为电力电子技术及其应用和电力电子系统中的电磁兼容设计。

(编辑 王彦骏)