

نحوه پیاده‌سازی پروتکل CANopen در MasterRTU

خسرو فراهانی لیلا عبدی

kfarahani@nri.ac.ir , labdi@nri.ac.ir

پژوهشگاه نیرو

ایران

واژه‌های کلیدی: RTU، CAN، CANopen و MasterRTU

چکیده

MasterRTU دستگاهی است که در پژوهشگاه نیرو به منظور اجرای سیستم اتوماسیون شبکه توزیع نیروی برق طراحی و ساخته شده است. این دستگاه می‌تواند علاوه بر برقراری ارتباط با مرکز دیسپاچینگ توزیع، جمع‌آوری اطلاعات و کنترل چند پست توزیع دیگر را برعهده گیرد. ارتباط میان ماژول‌های مختلف این RTU¹ از طریق شبکه صنعتی و استاندارد CAN با لایه کاربرد CANopen صورت می‌پذیرد. این مقاله سعی بر آن دارد تا با بیان نحوه استفاده از سرویس‌ها و امکانات مختلف پروتکل CANopen برای پیاده‌سازی عملکردهای مختلف موردنیاز RTU نظیر انتقال تغییر وضعیت‌ها با برچسب زمانی، اعمال فرمان، انتقال مقادیر آنالوگ، انتقال مقادیر شمارنده و ... راه را برای طراحان و سازندگان که برای اولین بار قصد پیاده‌سازی پروتکل CANopen را دارند، هموار سازد.

۱- مقدمه

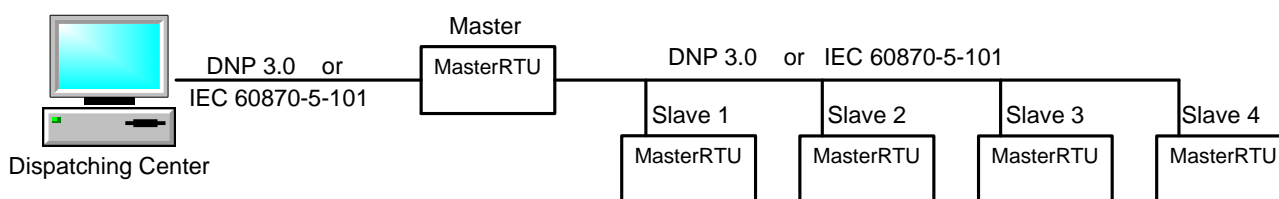
پایانه راه دور (RTU) یکی از اجزای سیستم‌های اتوماسیون می‌باشد که به عنوان یک محیط میانی برای عبور اطلاعات بین مرکز کنترل و فیلد به حساب می‌آید. در واقع از یک طرف به عنوان یک سیستم فرمان‌پذیر و غیرفعال در مقابل مرکز کنترل عمل می‌کند و از طرف دیگر وظیفه جمع‌آوری اطلاعات فیلد و ارسال آنها به مرکز کنترل را برعهده دارد. اطلاعاتی که در این میان رد و بدل می‌شوند شامل ورودی‌های دیجیتال، ورودی‌های آنالوگ، خروجی‌های دیجیتال و در برخی موارد خروجی‌های آنالوگ می‌باشند که در پایانه راه دور سرویس‌دهی می‌شوند.

MasterRTU طراحی و ساخته شده در پژوهشگاه نیرو با هدف پوشش دادن تعداد نقاط لازم برای پست‌های فوق توزیع با استفاده از قابلیت شبکه کردن پایانه‌های راه دور و حل مشکل مخابراتی در پست‌های فوق توزیع یعنی مشکل کم بودن کانال مخابراتی و هم‌چنین برای حل مشکلات

¹ - Remote Terminal Unit (RTU)

IEC 60870-5-101 با هم شبکه شده‌اند را نشان می‌دهد. سلول پنجم، هم وظیفه جمع‌آوری و کنترل سایر سلول‌ها را برعهده دارد (Master پروتکل DNP3.0 یا IEC 60870-5-101 است) و هم وظیفه ارتباط با مرکز کنترل با استفاده از یکی از پروتکل‌های IEC 60870-5-101 و یا DNP3.0 را عهده‌دار می‌باشد.

مخابراتی اتوماسیون شبکه توزیع یعنی زیاد بودن تعداد پست‌ها و مشکلات ناشی از آن در مرکز کنترل و هم‌چنین کم کردن توان فرستنده‌های رادیویی، طراحی و ساخته شده است. یک MasterRTU می‌تواند علاوه بر کنترل و مانیتور کردن یک پست توزیع وظیفه مانیتور کردن و کنترل چهار پست توزیع دیگر را برعهده بگیرد. شکل (۱) ساختار تشکیل شده از پنج سلول MasterRTU که به وسیله خط سریال RS485 و پروتکل DNP3.0 یا



شکل (۱) ارتباط میان MasterRTU ها

۲- شبکه CAN

CAN یک شبکه صنعتی برای ارتباط سریال میان دستگاه‌های مختلف می‌باشد و به شکل کارآمدی سیستم‌های DCS^۴ بلادرنگ^۵ را با درجه اطمینان بسیار بالایی پشتیبانی می‌کند. CAN ابتدا توسط دو شرکت Intel و Bosch برای استفاده در اتومبیل‌ها ابداع شد؛ اما در حال حاضر در بسیاری از سیستم‌های کنترلی به کار می‌رود. CAN یک خط ارتباطی دو سیمه، زوج دیفرانسیلی و Multimaster است و توسط موسسه استاندارد ISO در سال ۱۹۹۳ با شماره ISO 11898^۶ به صورت استاندارد در آمده است. CAN اساساً برای استفاده در محیط‌های صنعتی پر نویز ساخته شده و امکاناتی نظیر مصونیت بالا در برابر نویز و سرعت بالای انتقال اطلاعات را (حداکثر یک مگابیت بر ثانیه در طول ۴۰ متر) ارائه می‌کند. شبکه CAN شبکه‌ای مناسب برای انتقال داده‌های بلادرنگ با قابلیت بسیار بالا است. به طوری که احتمال آن که پیامی در شبکه CAN با خطا منتشر شود و این خطا کشف نگردد کمتر از $10^{-11} * 4/7$ می‌باشد.

ساختار بلوکی یک سلول در شکل (۲) نشان داده شده است. ماژول‌های I/O (شامل دو ماژول ورودی - خروجی دیجیتال^۱ (DIO) و دو ماژول آنالوگ^۲ (AI) می‌باشد) و ماژول اصلی^۳ پایانه راه دور از طریق گذرگاه داده CAN و پروتکل استاندارد CANopen در ارتباط می‌باشند.

ارتباط بین ماژول‌های I/O و ماژول اصلی در طراحی پایانه راه دور مساله مهمی است که بایستی پروتکل انتخابی با حفظ تمامی پارامترهای مربوط به پاسخ زمانی، امنیت و قابلیت اطمینان داده، ماژولار بودن و قابلیت توسعه I/O بتواند سرویس‌های داده در پایانه راه دور را به خوبی پشتیبانی کند. در طراحی MasterRTU از شبکه CAN با پروتکل لایه کاربرد CANopen برای ارتباط بین ماژول‌های I/O و ماژول اصلی استفاده شده است که در ادامه به ویژگی‌های آن اشاره می‌شود.

⁴- Distributed Control Systems

⁵- Real Time

⁶- International Standard Organization

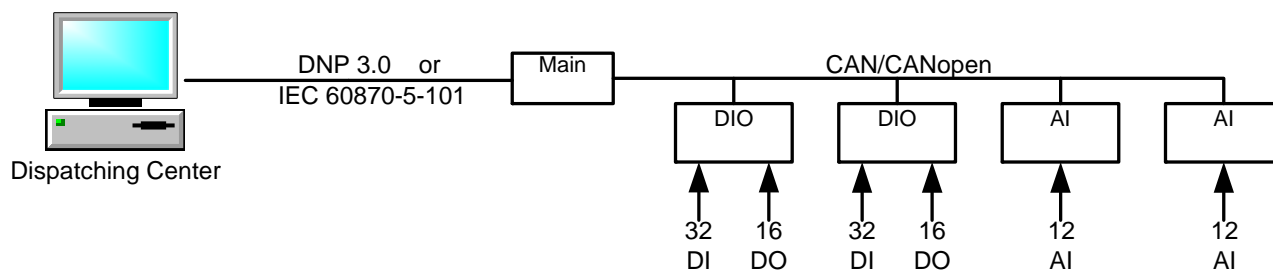
¹- Digital Input & Output Module

²- Analog Input Module

³- Main Board

بیست و چهارمین کنفرانس بین‌المللی برق

- ارسال مجدد پیامی که به علت برخورد، ارسال نشده است.
- ایجاد تقدم بین پیام‌ها
- تشخیص بین خطاهای موقتی و دائمی گره‌ها و خارج کردن گره‌های صدمه دیده از شبکه
- تشخیص زمان مشخص جهت آمدن پیام یک گره روی خط انتقال داده
- تضمین یک فاصله زمانی مشخص جهت آمدن پیام یک گره روی خط انتقال داده
- امکان ارسال پیام‌ها به صورت Multicast (ارسال پیام برای گروهی از گره‌ها)
- اولویت بالاتری دارد ارسال خواهد شد.
- در صورت برخورد اطلاعات روی خط انتقال داده، پیامی که اولویت بالاتری دارد ارسال خواهد شد.
- Multimaster بودن (در هر زمان هر کدام از دستگاه‌ها (گره‌ها) می‌توانند اقدام به ارسال اطلاعات کنند)
- قدرت بالا در تشخیص خطا و اعلام آن
- در صورت برخورد اطلاعات روی خط انتقال داده، پیامی که اولویت بالاتری دارد ارسال خواهد شد.



شکل (۲) ارتباط میان ماژول‌های یک MasterRTU

SDS بهره گرفته می‌شود. پروتکل CANopen دارای سرباره پروتکل کمی است که این مهم باعث کاهش بار پردازشی پردازنده سیستم نیز می‌شود. شبکه‌های صنعتی فیلد باس از نقطه نظر مدل شبکه‌ای OSI معمولاً در سه لایه فیزیکی، پیوند داده و کاربرد پیاده‌سازی می‌شوند. استاندارد CAN، دو لایه پایینی مدل مرجع هفت لایه‌ای ISO/OSI را شامل می‌شود؛ یعنی لایه‌های فیزیکی و پیوند داده. لایه پیوند داده استاندارد CAN، سرویس‌هایی را برای انتقال و درخواست واحدهای اطلاعاتی که بیش از هشت بایت نیستند، ارائه می‌کند. این سرویس‌ها ابتدا برای کاربرد کوچک مناسب بودند ولی در کاربردهای گسترده و پیچیده عملکردها و ویژگی‌های دیگری نیز مورد نیاز بود که این سرویس‌ها دیگر پاسخگو نبودند و این به معنای نیاز داشتن به سرویس‌هایی در

قابلیت‌ها و ویژگی‌های منحصر به فرد CAN در لایه‌های فیزیکی و پیوند داده موجب شده است تا انواع روش‌های ارتباطی توسط پروتکل‌های مختلف لایه کاربرد مورد استفاده قرار گیرد؛ خصوصاً روش Producer/Consumer که یک روش مطرح برای انتقال سریع اطلاعات در سیستم‌های بلادرنگ می‌باشد. CAN در بسیاری از صنایع نظیر خودروسازی، هواپیما سازی، کشتی سازی، اتوماسیون صنعتی، اتوماسیون ساختمان، اتوماسیون کارخانه و در ساخت بسیاری از کنترل کننده‌ها، سیستم‌های اندازه‌گیری و ... مورد استفاده قرار می‌گیرد. امروزه کنترل کننده شبکه CAN که به صورت سخت‌افزاری پیاده‌سازی می‌شود توسط بیش از ۲۲ سازنده تراشه پشتیبانی می‌شود. انواع پروتکل‌های لایه کاربرد برای کاربردهای مختلف تدوین گردیده است. در اتوماسیون صنعتی معمولاً از سه پروتکل CANopen, DeviceNet و

CANopen، فرهنگ اشیاء، روش‌های ارتباطی، وضعیت دستگاه‌ها در CANopen و نحوه پیاده‌سازی این پروتکل پرداخته می‌شود.

۳- مدل دستگاه در CANopen

CANopen از یک مدل شیء‌گرا برای تعریف دستگاه‌های استاندارد استفاده می‌کند. یعنی هر دستگاه را به صورت مجموعه‌ای از اشیاء نشان می‌دهد که از طریق شبکه CAN قابل دسترسی هستند. هر جنبه از عملکرد یک دستگاه در یک یا چند شیء گنجانده می‌شود. بنابراین تغییر پیکربندی یا وضعیت دستگاه به سادگی از طریق شبکه با تغییر صفات یک شیء خاص قابل انجام است. شکل (۴) مدل دستگاه در CANopen را نشان می‌دهد.

همان‌طور که در شکل مشاهده می‌شود به طور کلی دو نوع شیء در CANopen تعریف می‌شود.

- اشیاء ارتباطی^۴

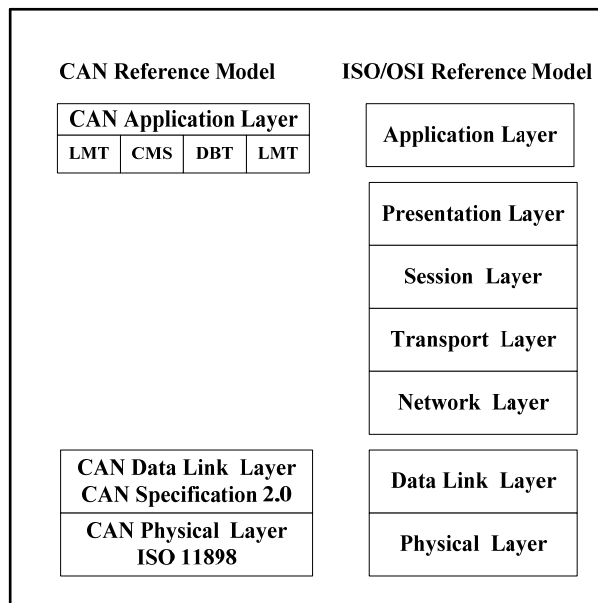
این اشیاء ارتباطی در لایه کاربرد CANopen تعریف می‌شوند و هر یک مشخص کننده یک عملکرد ارتباطی خاص در دستگاه می‌باشند.

- اشیاء کاربرد^۵

هر یک از این اشیاء بیانگر یک عملکرد خاص از دستگاه می‌باشند و در پروفایل دستگاه تعریف می‌شوند. مانند وضعیت یک ورودی دیجیتال.

تمام اشیاء یک دستگاه از طریق فرهنگ اشیاء آن دستگاه قابل دسترسی هستند. فرهنگ اشیاء مهم‌ترین قسمت یک مدل دستگاه و شامل تمام خصوصیات ساختاری داخلی یک دستگاه می‌باشد. برای هر گره در شبکه یک فرهنگ اشیاء وجود دارد که تمام پارامترهای توصیف یک دستگاه و رفتارهای آن را در شبکه دربرمی‌گیرد. هر شیء با یک اندیس ۱۶ بیتی آدرس‌دهی می‌شود و برای دسترسی به صفات شیء یک زیراندیس ۸ بیتی نیز تعریف می‌شود.

لایه‌های بالاتر می‌باشد. این عاملی بود که سبب شد سازمان CiA^۱ پروتکل لایه کاربرد CAL^۲ را تعریف کند. شکل (۳) مدل مرجع CAN و ارتباط آن با مدل هفت لایه ISO/OSI را نشان می‌دهد. پروتکل CANopen لایه کاربرد شبکه CAN می‌باشد که سرویس‌های مدیریت شبکه و سرویس‌های مختلف ارتباطی را ارائه می‌دهد.

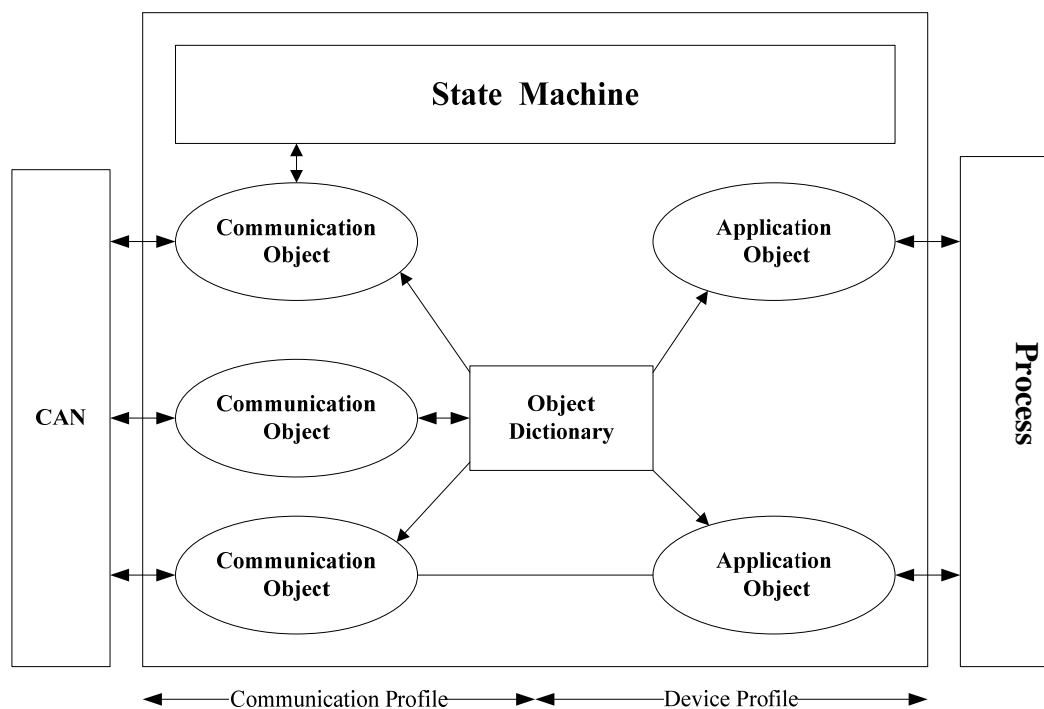


شکل (۳) مدل مرجع CAN

شبکه CAN یک شبکه Multi Master است و در آن هر یک از ماژول‌ها می‌توانند در هر لحظه اقدام به ارسال اطلاعات نمایند و در صورتی که دو یا چند ماژول همزمان اقدام به ارسال پیام نمایند، پیامی که دارای اولویت بالاتری است روی شبکه منتقل خواهد شد. در پایانه راه دور طراحی شده، مدیریت شبکه CANopen برعهده ماژول اصلی است. این ماژول اطلاعات دریافتی از سایر ماژول‌ها را به مرکز کنترل ارسال می‌کند و فرمان‌های صادر شده از مرکز کنترل را روی شبکه CANopen برای ماژول موردنظر ارسال می‌کند. پروتکل CANopen یک فرهنگ اشیاء^۳ معرفی می‌کند که خاص CANopen می‌باشد. در ادامه به معرفی مدل دستگاه در

^۴- Communication Objects
^۵- Application Objects

^۱- CAN in Automation
^۲- CAN Application Layer
^۳- Object Dictionary



شکل (۴) مدل دستگاه در CANopen

پروفایل‌های دستگاه پروتکل CANopen می‌توانند قابلیت اطمینان سیستم را بالا ببرند و به سبب انعطاف‌پذیری زیادی که دارند پاسخگوی نیازهای خاص استفاده‌کنندگان نیز می‌باشند.

بخشی از فرهنگ اشیاء که پارامترهای ارتباطی را تعیین می‌کند برای همه وسایل یکسان است و بخشی که خاص وسیله می‌باشد برای انواع وسایل متفاوت است.

۴- پیام‌های CANopen

مدل ارتباطی CANopen چهار نوع پیام و شیء ارتباطی، را تعریف می‌کند:

۴-۱- پیام مدیریتی شبکه

این نوع پیام، امکان برقراری یک ارتباط Master/Slave را ایجاد می‌کند که می‌تواند برای کنترل دستگاه و بازپرسی وضعیت دستگاه به کار برود و این همان مفهوم مدیریت شبکه (NMT)^۳ است.

CANopen با یک سری اسناد به نام پروفایل^۱ تعریف می‌شود. معمولاً یک پروفایل زیر مجموعه‌ای از سرویس‌هایی است که به وسیله پروتکل‌ها حاصل شده‌اند. یکی از آنها پروفایل ارتباطی^۲ است که فرم عمومی فرهنگ اشیاء و پارامترهای ارتباطی اشیاء مرتبط با ناحیه پروفایل ارتباطی فرهنگ اشیاء را توصیف می‌کند. این پروفایل که در همه دستگاه‌های CANopen پیاده‌سازی می‌شود در واقع اشیاء ارتباطی CANopen را توصیف می‌کند. پروفایل دیگر پروفایل دستگاه است که مشخص می‌کند که چگونه یک قابلیت خاص از یک دستگاه از طریق شبکه CAN قابل دسترسی است و اینکه چه ابزارهایی از پروفایل ارتباطی برای دسترسی به این قابلیت موردنیاز می‌باشد. برای هر نوع دستگاه که در یک محیط صنعتی به شبکه CAN متصل می‌شود یک پروفایل دستگاه تعریف می‌شود. در طرح MasterRTU از پروفایل DS401 که یک پروفایل استاندارد برای ماژول‌های ورودی - خروجی می‌باشد و از سوی CiA معرفی شده، استفاده گردیده است.

^۱- Device Profile

^۲- Communication Profile

^۳- Network Management

۲-۴-۲- پیام SDO^۱

SDO برای برقراری یک ارتباط Client/Server بین دو دستگاه CANopen به کار می‌رود که به موجب آن دستگاه Client می‌خواهد به منظور خواندن و یا نوشتن به فرهنگ اشیاء دستگاه Server دست پیدا کند. سرویس‌های SDO اطلاعات اندیس و زیراندیس اشیاء را با خود حمل می‌کنند که به موجب آن آدرس دهی فرهنگ اشیاء امکان‌پذیر می‌شود. این سرویس امکان انتقال هر طول داده را فراهم می‌سازد و در صورتی که طول داده از ۴ بایت بیشتر باشد آن را تقسیم کرده و در چندین پیام CAN ارسال می‌کند. سرویس SDO از نوع "Confirmed Service" است و یک پاسخ برای هر پیام از این نوع برگردانده می‌شود و هر پیام درخواست و پاسخ SDO، ۴ بایت داده را شامل می‌شود و از این رو ارتباط از طریق SDO دارای سرباره است که نمی‌توان از آن چشم‌پوشی کرد.

۲-۴-۳- پیام PDO^۲

PDO دسترسی مستقیم به اشیاء کاربردی درون یک دستگاه را فراهم می‌سازد. از این سرویس برای انتقال داده Real-Time استفاده می‌شود. داده از یک Producer به یک یا چند Consumer منتقل می‌شود. داده‌ای که یک PDO حمل می‌کند کوچکتر یا مساوی هشت بایت می‌تواند باشد. در یک دستگاه CANopen، پیام PDO ی تولید و ارسال شده توسط دستگاه، TPDO یا Transmit PDO و پیام PDO ی دریافت و مصرف شده توسط دستگاه، RPDO یا Receive PDO نامیده می‌شود. هر PDO با دو شیء در فرهنگ اشیاء توصیف می‌شود. یکی پارامتر ارتباطی PDO، که در بردارنده شناسه پیام^۳ مورد استفاده به وسیله PDO، نوع انتقال Inhibit Time (حداقل زمان بین دو PDO متوالی را تعیین می‌کند) و پریود تایمر (فواصل زمانی ارسال PDO را تعیین می‌کند) می‌باشد.

شیء دیگر پارامتر نگاشت PDO است که معین می‌کند کدام داده در کدام قسمت فیلد داده پیام CAN قرار خواهد گرفت. این کار اجازه می‌دهد تا بدون گنجاندن اطلاعات اضافی در

پیام، هم تولید کننده پیام و هم مصرف کننده آن، اطلاعات دقیقی از داده درون پیام داشته باشند.

برای ارسال PDO چندین روش وجود دارد که عبارتند از:

- ارسال همزمان^۴

ارسال PDO به صورت همزمان وابسته به دریافت پیام متناوب Sync (به بخش ۴-۴-۱ مراجعه شود) است. با این روش پیاده‌سازی روش‌های جمع‌آوری داده^۵ به صورت همزمان، از طریق شبکه CANopen امکان‌پذیر می‌شود.

Sync PDO را می‌توان به دو دسته دوره‌ای^۶ و یا غیر دوره‌ای^۷ تقسیم کرد. نوع دوره‌ای با دریافت تعداد خاصی شیء همزمان‌ساز و نوع غیر دوره‌ای با دریافت یک شیء همزمان‌ساز (به بخش ۴-۴-۱ مراجعه شود) ارسال می‌شود.

- ارسال غیرهمزمان^۸

ارسال PDO با وقوع یک حادثه، بدون هیچ ارتباطی با شیء همزمان‌ساز انجام می‌شود.

روش ارسال PDO در پارامترهای ارتباطی آن تنظیم می‌شود. پیام PDO بدون سرباره پروتکل است و حداکثر ۸ بایت داده را منتقل می‌کند.

۴-۴-۴- پیام‌های خاص

۴-۴-۴-۱- پیام Synchronization (SYNC)

شیء همزمان‌ساز به وسیله دستگاهی که مسئولیت همزمان‌سازی را در شبکه برعهده دارد، به صورت متناوب در شبکه منتشر^۹ می‌شود. در واقع از این پیام برای پیاده‌سازی یک ساعت همگانی در شبکه استفاده می‌شود. هر دستگاه ممکن است در این شیء برای همزمان کردن خود با سایر دستگاه‌های موجود در شبکه استفاده کند یا نکند.

۴-۴-۴-۲- پیام Time Stamp

این سرویس برای فراهم کردن یک زمان مرجع در تجهیزات شبکه استفاده می‌شود.

4- Synchronous

5- Data Acquisition

6- Cyclic

7- Acyclic

8- Asynchronous

9- Broadcast

1- Service Data Object

2- Process Data Object

3- COB-ID

۴-۳-۴- پیام اضطراری^۱

این پیام برای مطلع ساختن دستگاه‌های CANopen از وقوع یک خطای داخلی در یک دستگاه است. وقتی که یک خطای داخلی در دستگاهی رخ می‌دهد، دستگاه یک پیام اضطراری را ارسال می‌کند که عکس‌العمل مناسب به این حادثه برعهده مدیر شبکه می‌باشد.

۴-۴-۴- پیام Node/Life Guarding

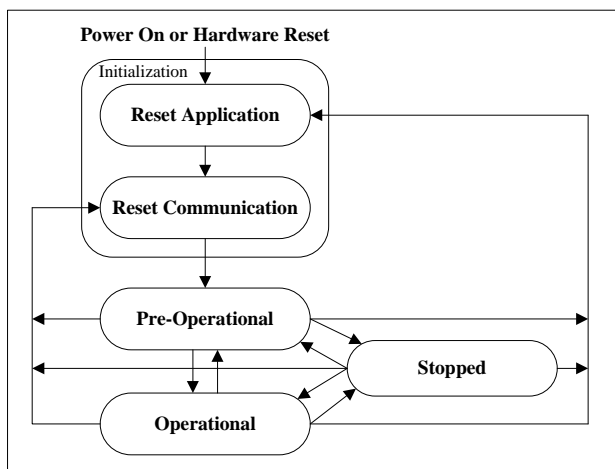
این پیام برای نظارت بر کار Slave ها به کار می‌رود. و NMT Master وضعیت گره‌های Slave را مانیتور می‌کند. از پیام Node Guarding برای تشخیص خطا در Slave ها به وسیله Master استفاده می‌شود و پیام Life Guarding هم برای تشخیص خطای Master به وسیله Slave ها به کار می‌رود.

۴-۵-۴- پیام Heartbeat

سرویس Heartbeat به صورت Producer/Consumer بوده و یک دستگاه (نه لزوماً) به عنوان Consumer، پیام‌های Producer ها را دریافت می‌کند و Producer وضعیت فعلی را برای Consumer ارسال می‌کند و در صورت تشخیص خطا و یا تاخیر در ارسال وضعیت، گزارش می‌شود. پارامترهای مربوط به این سرویس در فرهنگ‌های یکی دوره تناوب ارسال^۲ پیام‌ها از سوی تولید کننده می‌باشد و دیگری فاصله زمانی انتظار مصرف کننده^۳ برای دریافت پیام تولید کننده است که اگر این زمان سپری شود و پیام دریافت نشود، یک خطا گزارش خواهد شد.

۵- وضعیت دستگاه CANopen

یک دستگاه در شبکه CANopen مطابق با شکل (۵) کار می‌کند که خروج از یک وضعیت و رفتن به وضعیت دیگر به وسیله NMT Master و با استفاده از سرویس‌های کنترل مازول انجام می‌شود.



شکل (۵) دیاگرام وضعیت یک دستگاه در شبکه CANopen

یک دستگاه پس از روشن شدن وارد یک فاز آماده‌سازی^۴ می‌شود. این فاز به دو مرحله Reset Application و Reset Communication تقسیم می‌شود. با عبور از این مراحل به صورت خودکار، گره خودش را در وضعیت پیش‌فرض قرار می‌دهد، یعنی تمام پارامترهای داخلی دستگاه مانند پارامترهای ارتباطی و سایر ورودی‌های فرهنگ‌های اشیاء به مقدار پیش‌فرض تنظیم خواهد شد.

بعد از آماده‌سازی، گره به طور خودکار وارد وضعیت Per-Operational می‌شود. در این وضعیت استفاده از سرویس SDO مجاز است و می‌توان به وسیله آن پارامترهای دستگاه را تنظیم کرد.

پس از پیکربندی دستگاه، عملکرد عادی آن می‌تواند آغاز گردد. حالت کار عادی دستگاه وضعیت Operational نامیده می‌شود. انتقال از حالت Per-Operational به Operational به وسیله سرویس Start Remote Node که توسط مدیریت شبکه ارسال می‌شود، انجام می‌پذیرد. ممکن است دستگاه از حالت Operational به منظور تغییر پارامترهای پیکربندی با استفاده از سرویس Enter Per-Operational به حالت Per-Operational برده شود.

وضعیت Stopped در دیاگرام وضعیت معرف حالتی است که در آن باید تمام عملکردهای ارتباطی دستگاه متوقف شوند.

⁴- Initialization Phase

¹- Emergency Message

²- Heartbeat Producer Time

³- Heartbeat Consumer Time

انتقال به این حالت به وسیله Stop Remote Node انجام می‌شود. در هر وضعیتی تعدادی از سرویس‌ها مجاز می‌باشند که در جدول (۱) نشان داده شده است.

جدول (۱) سرویس‌های مجاز برای استفاده در هر وضعیت

	INITIALISING	PRE-OPERATIONAL	OPERATIONAL	STOPPED
PDO			x	
SDO		x	x	
Synchronisation Object		x	x	
Time Stamp Object		x	x	
Emergency Object		x	x	
Boot-Up Object	x			

در ادامه نحوه شروع به کار شبکه و مدیریت آن و همچنین نحوه پیاده‌سازی سرویس‌های مختلف پروتکل برای ماژول‌های I/O بررسی خواهد شد.

۶-۱- شروع به کار شبکه و نحوه مدیریت آن

پس از فعال شدن ماژول‌ها و آماده شدن آنها برای حضور در شبکه CANopen که وضعیت Pre-Operational نامیده می‌شود، ماژول‌های I/O با ارسال پیام Boot-Up وضعیت خود را به ماژول اصلی اعلام می‌نمایند. پس از ارسال پیام Boot-Up از ماژول‌های I/O وضعیت آنها در ماژول اصلی ثبت می‌شود و با ارسال اولین پیام Heartbeat از ماژول وضعیت آن بررسی می‌شود، در صورت عدم هم‌خوانی وضعیت ارسال شده با پیام Heartbeat و وضعیت ثبت شده در ماژول اصلی (پس از ارسال Boot-Up) فرمان Reset به ماژول ارسال خواهد شد. در غیر این صورت، تنظیم‌های اولیه توسط ماژول اصلی انجام خواهد شد. تنظیم‌های اولیه در ماژول‌های I/O با ارسال یک پیام Time Stamp شروع می‌شود و سپس با استفاده از سرویس SDO بسته به نوع ماژول، اگر DIO باشد، مدت زمان عمل کردن رله^۱ خروجی برحسب میلی ثانیه و مدت زمان حذف ارتعاشات^۲ ورودی‌های دیجیتال مقاداردهی اولیه خواهد شد و اگر ماژول AI باشد، درصد تغییرات در مقادیر ورودی به منظور ارسال و یا ثبت تغییر مقدار، مقاداردهی اولیه خواهد شد. در ادامه اگر تنظیم‌های اولیه به

۶- روش پیاده‌سازی پروتکل CANopen در MasterRTU

در طراحی این دستگاه دو نوع ماژول ورودی - خروجی وجود دارد که شامل ماژول ورودی آنالوگ و ماژول ورودی - خروجی دیجیتال می‌باشند. این دو نوع ماژول به همراه ماژول اصلی بر روی یک Backplane که گذرگاه CAN از روی آن به ماژول‌ها برده شده قرار می‌گیرند و از این طریق با هم در ارتباطند.

نمونه طراحی شده حداکثر دارای ۲ ماژول DIO، ۲ ماژول AI، ماژول تغذیه و ماژول اصلی می‌باشد که همه آنها دارای میکروکنترلر MC9S12DG256 از خانواده HC12 شرکت Freescale می‌باشند که این تراشه دارای کنترل کننده CAN نوع msCAN12 بوده و سرعت تنظیم شده برای آن 500kb/s است.

هر ماژول ورودی - خروجی دیجیتال (DIO) دارای ۳۲ ورودی دیجیتال و ۱۶ خروجی دیجیتال است که مطابق با پروفایل DS401 ارائه شده از CiA در شبکه CANopen طراحی شده است. همچنین هر ماژول آنالوگ (AI) دارای ۱۲ ورودی آنالوگ ۱۶ بیتی می‌باشد که مطابق با پروفایل DS401 و به صورت ماژول Analog Input طراحی شده است.

ماژول اصلی به عنوان Master شبکه CANopen عمل می‌کند و کار مدیریت شبکه، پیکربندی و تنظیم ماژول‌های شبکه، جمع‌آوری داده‌های ماژول‌ها و ارسال فرمان به آنها را انجام می‌دهد که مطابق با پروفایل DS301 طراحی شده است.

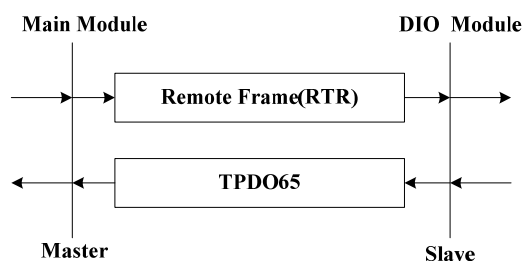
¹ - Relay On-Time

² - Bounce Time

۶-۲-۱- ارسال وضعیت اولیه ورودی‌های دیجیتال برای برد

اصلی RTU

همان‌طور که اشاره شد هر برد DIO دارای ۳۲ ورودی دیجیتال می‌باشد که با رفتن ماژول DIO به حالت Operational بلافاصله برد اصلی RTU با ارسال پیام RTR به ماژول DIO درخواست ارسال وضعیت اولیه نقاط ورودی دیجیتال را از این ماژول می‌کند و ماژول DIO در پاسخ با سرویس TPDO65 وضعیت اولیه ۳۲ ورودی دیجیتال را برای برد اصلی RTU ارسال می‌کند. شکل (۶) نحوه پیاده‌سازی این عملیات را نشان می‌دهد.



شکل (۶) نحوه پیاده‌سازی عملیات ارسال وضعیت اولیه ورودی‌های دیجیتال برای برد اصلی RTU

۶-۲-۲- ارسال تغییر وضعیت ورودی‌های دیجیتال به همراه

ثابت برچسب زمانی

تغییر وضعیت‌های رخ داده در نقاط ورودی دو وضعیتی به همراه زمان وقوع آنها توسط ماژول DIO به برد اصلی RTU اعلام می‌شود. از آنجائی که زمان تغییر وضعیت ورودی‌های دیجیتال یک پارامتر بسیار مهم در بهره‌برداری شبکه برق می‌باشد لذا ثبت دقیق آن با دقت تفکیک یک میلی ثانیه برحسب یک زمان مطلق و بر پایه یک مرجع زمانی استاندارد حائز اهمیت است.

برای این منظور در طراحی RTU ها روش‌های مختلفی برای حفظ زمان و دقت زمانی پیاده‌سازی می‌شود. در این طرح، ماژول اصلی با مرکز کنترل در ارتباط بوده و زمان را از مرکز دریافت می‌کند و با مجهز بودن به RTC^۲، در فاصله زمانی بین دو پیام هم‌زمانی از مرکز، زمان را نگه می‌دارد و همین

طور مطلوب انجام شدند، پیام Start Remote Node از طرف ماژول اصلی به ماژول I/O ارسال می‌شود تا وضعیت آن از Pre-Operational به Operational تغییر یابد و اگر تنظیم‌های اولیه انجام نشود، پیام Reset ارسال خواهد شد و اگر تا سه مرتبه این کار انجام نشود پیام Stop ارسال می‌گردد و ماژول I/O به وضعیت Stop می‌رود.

پس از تغییر وضعیت ماژول I/O به حالت Operational، بلافاصله ماژول اصلی پیام RTR^۱ را ارسال می‌کند و ماژول‌های I/O با استفاده از سرویس PDO مقادیر جاری همه ورودی‌ها را روی شبکه می‌فرستند. در این صورت ورودی‌ها معتبرند و در غیر این صورت ورودی‌ها به صورت Offline خواهند بود.

در ادامه چنانچه وضعیت فرستاده شده با Heartbeat وضعیت ثبت شده در ماژول اصلی مطابقت نداشته باشد، پیام Reset فرستاده می‌شود و هم‌چنین پس از پیام ری‌ست ماژول‌ها با پیام Boot-Up به شبکه CANopen وارد می‌شوند و تمام مراحل مشابه به روند فعال شدن اولیه آنها می‌باشد و در صورت عدم دریافت پیام Heartbeat از ماژول I/O (در طی مدت زمان تعیین شده)، وضعیت آن به حالت اولیه تغییر می‌یابد.

۶-۲-۳- نحوه پیاده‌سازی پروتکل CANopen و استفاده از

سرویس‌های آن در ماژول ورودی - خروجی دیجیتال (DIO)

در ماژول DIO نیاز است که توسط سرویس‌های CANopen عملیات‌های زیر انجام شوند:

۱. ارسال وضعیت اولیه ورودی‌های دیجیتال برای برد اصلی RTU
 ۲. ارسال تغییر وضعیت ورودی‌های دیجیتال به همراه ثابت برچسب زمانی
 ۳. فرمان دادن به خروجی‌های دیجیتال
 ۴. ارسال مقادیر شمارنده‌ها برای برد اصلی RTU
- در ادامه به بررسی پیاده‌سازی عملیات‌های ذکر شده به وسیله سرویس‌های پروتکل CANopen پرداخته شده است.

^۲ - Real-Time Clock

^۱ - Remote Transmit Request

بیست و چهارمین کنفرانس بین‌المللی برق

پشتیبانی نمی‌کند از این رو در جمع‌آوری داده‌های مربوط به تغییر وضعیت ورودی‌های دیجیتال که زمان تغییر آنها نیز ثبت می‌شود از سرویس MPDO استفاده شده است. فرم یک پیام MPDO در شکل (۷) نشان داده شده است.



شکل (۷) فرمت یک پیام MPDO مفهوم فیلد آدرس و پرچم f در یک پیام MPDO در جدول (۲) نشان داده شده است.

مفهوم فیلد آدرس و پرچم f در یک پیام MPDO در جدول (۲) نشان داده شده است.

فیلد f به معنای Format Flag می‌باشد و فیلد آدرس هم بسته به پرچم f معانی مختلفی دارد. فیلد مالتی پلکسر، اندیس و زیراندیس ورودی فرهنگ اشیا را در خود نگه می‌دارد.

جدول (۲) مفهوم فیلد آدرس و پرچم f در یک پیام MPDO

f	addr	Usage
0	0	Reserved
0	1-127	Source addressing. Addr is a single producer's Node ID. Multiplexor is index and sub-index of the object dictionary of the producer.
1	0	Destination addressing. The consumer is a group.
1	1-127	Destination addressing. Addr is a single consumer's Node ID. Multiplexor is index and sub-index of the object dictionary of the consumer.

ذکر است که لرزش به حالتی اطلاق می‌شود که تعداد تغییرات یک ورودی دیجیتال، از وضعیتی به وضعیت دیگر، بیشتر از حد معمول و پیش‌بینی شده آن ورودی باشد که این حالت گه‌گاه به هنگامی که یک تجهیز معیوب باشد به وجود می‌آید و از آنجایی که تعداد زیاد تغییر وضعیت‌ها موجب اشغال شدن بیش از اندازه کانال مخابراتی و ثبت بی‌دلیل تعداد زیادی تغییر وضعیت در لیست وقایع مرکز کنترل می‌شود، لذا برای اینکه یک ورودی معیوب عملکرد سیستم را مختل نکند از نفوذ تغییر وضعیت‌های آن به داخل سیستم جلوگیری می‌شود. با تشخیص ورود یک ورودی دیجیتال به حالت لرزش، بیت Chatter In در فیلد داده یک شده و به برد اصلی RTU اطلاع داده می‌شود در صورت خروج از حالت لرزش

طور زمان هر یک از ماژول‌ها را با استفاده از پیام Time Stamp در شروع عملکرد ماژول I/O در شبکه و نیز زمان‌های همزمانی RTU با مرکز، روی شبکه CANopen ارسال می‌شود و ماژول‌ها با دریافت آن پیام، زمان داخلی خود را به صفر تنظیم می‌کنند و زمان ماژول‌ها در فاصله زمانی بین پیام‌های Time Stamp به وسیله تایمرهای داخلی هر ماژول جداگانه برحسب میلی ثانیه شمرده می‌شود و در صورت تغییر وضعیت ورودی دیجیتال، زمان شمرده شده در ماژول I/O به صورت برچسب زمانی به وضعیت جدید ورودی اضافه شده و به ماژول اصلی ارسال می‌گردد و ماژول اصلی زمان واقعی را از روی آن بازسازی می‌کند.

نقاط ورودی ماژول DIO هر یک میلی ثانیه اسکن می‌شوند و به محض مشاهده تغییری در وضعیت یک نقطه ورودی، یک پیام MPDO (Multiplexor PDO) به برد اصلی RTU ارسال می‌شود. پروفایل استاندارد DS401، داده با برچسب زمانی را

فیلد داده شامل ۴ بایت است که ۲۸ بیت آن برای ثبت برچسب زمانی در نظر گرفته شده و ۴ بیت بالایی بایت هفتم مربوط به وضعیت ورودی موردنظر است. شکل (۸) فیلد داده پیام MPDO را نشان می‌دهد.

Bit 31	Bit 30	Bit 29	Bit 28	Bit 27-0
State	Invalid Time	Chatter In	Chatter Out	Time Tag

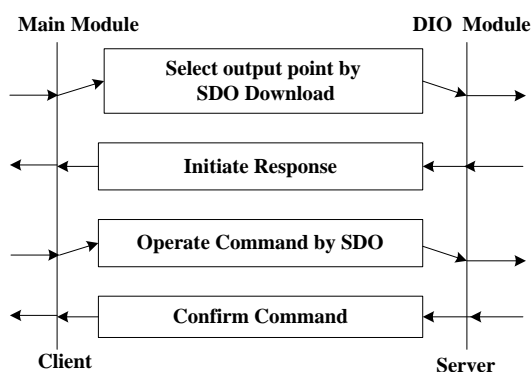
شکل (۸) فیلد داده یک پیام MPDO

علاوه بر زمان وقوع تغییر وضعیت و وضعیت فعلی یک ورودی دیجیتال، رفتن یک ورودی به حالت خطای لرزش^۱ و خروج از آن و معتبر بودن زمان نیز ارسال می‌شود. لازم به

^۱- Chatter

فرمان کنترلی به صورت "انتخاب قبل از اجرا" طراحی شده است. در مرحله اول خروجی موردنظر با نوشتن در بیت متناظر با آن از طریق پیام SDO فعال می‌شود و در صورت اجرای صحیح، تایید آن به ماژول اصلی برگردانده می‌شود سپس در ادامه و در صورت موفق بودن مرحله قبلی (انتخاب) به وسیله پیام SDO، فرمان اجرا، بسته به اینکه فرمان باز^۲ یا فرمان بسته^۳ باشد به خروجی موردنظر اعمال می‌شود و در صورت موفق بودن، تایید اجرای آن به ماژول اصلی RTU برگردانده می‌شود. در صورت انحراف از اعمال فرمان در هر مرحله‌ای با نوشتن صفر از طریق پیام SDO در خروجی‌ها فرمان غیرفعال می‌شود.

شکل (۱۰) نحوه ارتباط بین ماژول اصلی و ماژول DIO برای اعمال فرمان به خروجی با استفاده از سرویس SDO را نشان می‌دهد.



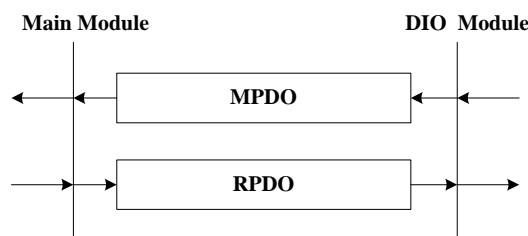
شکل (۱۰) نحوه پیاده‌سازی عملیات اعمال فرمان به یک خروجی دیجیتال

۴-۲-۶-۴- ارسال مقادیر شمارنده‌های پالس^۴ برای برد اصلی

RTU از مجموع ۳۲ ورودی دیجیتال یک ماژول DIO با تنظیم سخت‌افزاری دو جامپر روی برد می‌توان ورودی‌های اول و دوم آن را به صورت ورودی از نوع شمارنده، استفاده کرد. با ارسال پیام RTR از طرف برد اصلی RTU، مقادیر شمارنده‌های پالس از برد DIO درخواست می‌شود و برد

نیز بیت Chatter Out یک شده و به برد اصلی RTU گزارش می‌شود.

برای اطمینان از رسیدن یک تغییر وضعیت در ورودی‌های دیجیتال به برد Main از پیام RPDO1 استفاده می‌شود. بدین صورت که هر تغییر وضعیتی که برد DIO برای برد اصلی ارسال می‌کند منتظر می‌شود تا برد اصلی جواب دهد که آن را دریافت کرده است. اگر به هر دلیل بعد از مدت زمانی جواب از طرف برد اصلی RTU دریافت نشود، دوباره پیام مربوط به گزارش تغییر وضعیت از طرف ماژول DIO ارسال می‌شود. شکل (۹) نحوه پیاده‌سازی عملیات گزارش تغییر وضعیت ورودی دیجیتال به برد اصلی RTU را نشان می‌دهد.



شکل (۹) نحوه پیاده‌سازی عملیات گزارش تغییر وضعیت ورودی دیجیتال به برد اصلی

۴-۲-۶-۳- فرمان دادن به خروجی‌های دیجیتال

اعمال فرمان به رله‌های خروجی ماژول DIO در دو مرحله صورت می‌گیرد بدین صورت که ابتدا نقطه خروجی انتخاب می‌شود و سپس فرمان مرتبط با آن نقطه اعمال می‌شود.

پروفایل DS401 سرویس PRDO را برای خروجی‌های دیجیتال تعریف می‌کند که یک مود عملکردی مستقیم دارد و بدون تایید صورت می‌پذیرد. از آنجائی که اعمال فرمان به خروجی‌ها در RTU در دو مرحله انتخاب و اجرا^۱ انجام می‌شود و هم‌چنین تضمین اعمال و صحت فرمان بسیار حیاتی می‌باشد، در این طراحی از سرویس SDO استفاده شده است تا در هر مرحله با تایید پیام فرستاده شده از گیرنده، عملکرد صحیح آن تضمین شود.

اعمال فرمان به وسیله سرویس SDO از ماژول اصلی به ماژول DIO ارسال می‌شود.

²- Trip

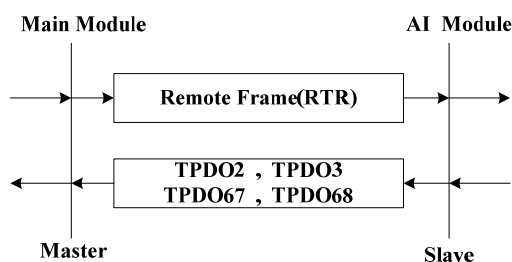
³- Close

⁴- Pulse Counters

¹- Select Before Operate (SBO)

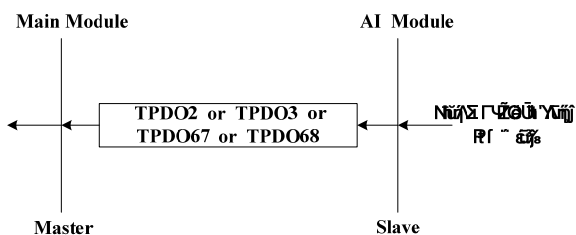
بیست و چهارمین کنفرانس بین‌المللی برق

شکل (۱۲) نحوه پیاده‌سازی عملیات جمع‌آوری مقادیر اولیه ورودی‌های آنالوگ را نشان می‌دهد.



شکل (۱۲) نحوه پیاده‌سازی عملیات جمع‌آوری مقادیر اولیه ورودی‌های آنالوگ

شکل (۱۳) نحوه پیاده‌سازی عملیات ارسال مقادیر جدید ورودی‌های آنالوگ به برد اصلی را نشان می‌دهد.



شکل (۱۳) نحوه پیاده‌سازی عملیات ارسال مقادیر جدید ورودی‌های آنالوگ به برد اصلی

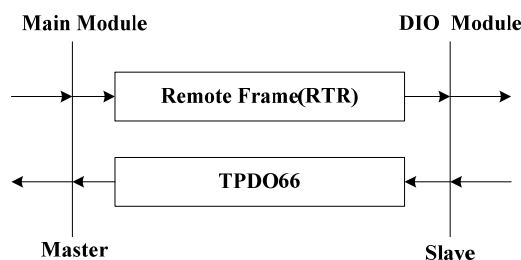
۷- نتیجه‌گیری

در این مقاله، ضمن معرفی اجمالی پروتکل CANopen، نحوه پیاده‌سازی این پروتکل در MasterRTU طراحی و ساخته شده در گروه دیسپاچینگ و تله‌متری پژوهشگاه نیرو ارائه گردید.

در ساختار پایانه‌های راه دور (RTU ها)، ماژول‌های ورودی - خروجی (I/O) و ماژول اصلی غالباً به صورت مجزا طراحی می‌شوند و بایستی ماژول‌های I/O از طریق یک گذرگاه داده با ماژول اصلی در ارتباط باشند. ارتباط بین ماژول‌های I/O و ماژول اصلی در طراحی RTU مساله بسیار مهمی است که بایستی با حفظ تمامی پارامترهای مربوط به پاسخ زمانی، امنیت و قابلیت اطمینان داده، ماژولار بودن و قابلیت توسعه I/O ها بتواند سرویس‌های داده در RTU را به خوبی پشتیبانی کند.

DIO با ارسال پیام TPDO مقدار دو شمارنده ۲۴ بیتی را برای برد اصلی می‌فرستد.

شکل (۱۱) نحوه پیاده‌سازی عملیات ارسال مقادیر شمارنده‌های برد DIO را نشان می‌دهد.



شکل (۱۱) نحوه پیاده‌سازی عملیات ارسال مقادیر شمارنده‌های برد DIO به برد اصلی

۳-۶- نحوه پیاده‌سازی پروتکل CANopen و استفاده از سرویس‌های آن در ماژول ورودی آنالوگ (AI)

هر ماژول آنالوگ دارای ۱۲ کانال ورودی می‌باشد. ورودی‌ها می‌توانند DC یا AC باشند. برای ورودی‌های AC پارامترهای مقادیر موثر ولتاژها، جریان‌ها و توان اکتیو محاسبه می‌شوند. برای ارسال این مقادیر از چهار سرویس TPDO2، TPDO3، TPDO67 و TPDO68 استفاده شده است که بلافاصله پس از پیام Start Remote Node با ارسال پیام RTR از ماژول اصلی، تمام مقادیر ورودی‌های آنالوگ به وسیله ماژول AI ارسال می‌شوند و سپس ماژول AI به صورت دوره‌ای و به فاصله زمانی قابل تنظیم (پیش فرض هر ۱ دقیقه) اقدام به ارسال مقادیر آنالوگ به ماژول اصلی می‌کند.

هم‌چنین اگر دامنه تغییرات برای پارامترهای اندازه‌گیری شده، خارج از محدوده تعیین شده باشد مقادیر جدید پارامترهای تغییر یافته در فرهنگ اشیاء ماژول نوشته می‌شود و بلافاصله پیام TPDO حاوی مقادیر جدید برای برد اصلی ارسال می‌گردد. این بدان معنی است که اگر مقادیر جدید پارامترهای اندازه‌گیری شده با مقادیر قبلی آن که در فرهنگ اشیاء موجود است، بیش از مقدار تعیین شده (Value Difference) تفاوت داشته باشد مقدار جدید در فرهنگ اشیاء نوشته شده و برای برد اصلی هم ارسال می‌گردد.

در تجربه ساخت MasterRTU در پژوهشگاه نیرو، شبکه CAN با پروتکل لایه کاربرد CANopen برای ارتباط بین ماژول‌های I/O و ماژول اصلی RTU، به کار رفته است. این پروتکل امکان سرویس‌دهی به انواع داده‌های RTU را می‌دهد. هم‌چنین ماژول‌های I/O در این شبکه به صورت مستقل از هم عمل کرده و هر کدام به عنوان یک گره مستقل در شبکه عمل می‌کنند. بدین ترتیب ساختار ماژولار پیدا کرده است. ماژولار بودن RTU در قالب شبکه CANopen قابلیت عیب‌یابی ماژول‌های I/O را به خوبی فراهم می‌سازد و گسترش تعداد نقاط I/O را آسان می‌کند. این تجربه نشان می‌دهد پروتکل CANopen با قابلیت‌های توانمند خود که حاصل از ویژگی‌های منحصر به فرد فیلد باس CAN می‌باشد، می‌تواند پروتکل مناسبی برای انتقال داده‌های بلادرنگ در دستگاه‌هایی نظیر RTU باشد. سرعت و کارایی بالای شبکه CANopen باعث می‌شود تا بتوان شبکه ماژول‌های ورودی و خروجی MasterRTU را به راحتی گسترش و به تمامی نیازهای عملکردی دستگاه RTU پاسخ مناسب داد.

۸- مراجع

- [1] CAN-in-Automation
CAL, CAN Application Layer for Industrial Applications, CiA DS-201 to DS-207, Version 1.1, 1, Feb 1996.
- [2] CAN-in-Automation
CANopen, CAL-based Communication Profile for Industrial Systems, CiA DS301, Version 4.1, 1, Jun 2000.
- [3] CAN-in-Automation
CANopen, Device Profile for I/O Modules, CiA DS-401, Ver 2.0, 20, Dec 1999.
- [۴] گروه پژوهشی دیسپاچینگ و تله‌متری، "گزارش استاندارد CAN، پروتکل CANopen و استخراج پروتکل CANopen برای پایانه توزیع"، پژوهشکده کنترل و مدیریت شبکه، پژوهشگاه نیرو، شهریور ۸۰.
- [۵] گروه پژوهشی دیسپاچینگ و تله‌متری، "گزارش نرم‌افزار MasterRTU و گزارش آزمون‌ها"، پژوهشکده کنترل و مدیریت شبکه، پژوهشگاه نیرو، آذر ۸۶.