

실시간 분산 제어 시스템용 고속 전이중 이더넷 기반 통신망의 설계 및 성능 평가

최재영, 김형석, 권옥현
서울 대학교 전기공학부

이성우, 송성일
한국 전력 연구원

Real-time Full-duplex Ethernet Networks for Real-time Distributed Control System

Jae Young Choi, Hyung Seok Kim, Wook Hyun Kwon
School of Electrical Engineering, Seoul National University

Sung Woo Lee
Korea Electric Power Research Institute

Abstract - 본 논문에서는 일대일 전송에 국한되어 사용되는 전이중 패스트 이더넷 방식을 응용하여 고속 브로드 캐스팅 통신망을 구성하고 실시간 전송을 요구하는 데이터를 효율적으로 전달할 수 있는 알고리즘을 제시한다. 제안된 통신망의 세부구조와 통신망의 데이터 송수신 동작 등을 설명하고, 실시간 데이터 전송을 보장하기 위하여 실시간 메시지 스케줄링 알고리즘을 제시한다. 제시된 알고리즘을 적용하였을 때의 각종 시변수들에 대한 수학적 분석을 통하여 실시간성 보장에 대한 성능 평가를 포함한 통신망 성능 평가를 수행한다. 제안된 통신망 FER(Full-duplex Ethernet networks for Real-time communication)의 실제 구현 및 응용 대상에 대해서 언급한다.

고 두배의 속도를 가지는 변형 Ethernet 프로토콜이다. 이에 약간의 디바이스를 추가하여 실시간 통신을 보장하고 고속의 성능을 가지며 많은 노드를 허브 등을 사용하지 않고 연결이 가능하도록 하는 링형 통신망을 제안한다. 제안된 통신망에서는 보통 링형 통신망에서의 브로드캐스팅에 의한 성능 저하를 막기 위하여 링형의 외관으로 실제 통신은 버스 형태로 통신하도록 하는 토폴로지 변환 스위치(topology conversion switch, TCS)를 설계한다. 이렇게 설계된 네트워크를 실제 산업 현장에 적용하기 위해서, MPC8260 이라는 마이크로콘트롤러를 사용한 네트워크 인터페이스 카드 (network interface card (NIC))를 개발하였다.

1. 서 론

발전소나 산업용 플랜트같은 곳에 쓰이는 분산 제어 시스템 (distributed control systems, DCS)은 많은 이득을 준다. DCS에서는 안정적인 운용과 제어를 위해 실시간성의 통신 네트워크를 사용해야만 한다. 이러한 네트워크는 분산된 컨트롤러들을 연결하고 그들 사이의 통신을 하게 해주는 역할을 한다. 또한 슈퍼바이저 시스템으로 모니터링 데이터와 알람 신호를 전송해주는 역할도 하게 된다. 이러한 네트워크의 통신 프로토콜은 실시간성을 보장하는 것과 동시에 고속으로 데이터를 전송하고 통신의 신뢰도를 높이는 등의 여러가지 점점 더 좋은 성능을 요구하고 있다.

패스트 이더넷은 여러 종류의 통신 네트워크에서 널리 쓰이는 고속의 네트워크 프로토콜이다. 패스트 이더넷은 가격이 저렴하고 구현하기 쉽다는 장점이 있다. 또한 벤더가 많으며, 오랫동안 많은 사람에게 대해 많이 사용되면서 검증받아 왔으며 연구도 많이 되어 있다. 이처럼 패스트 이더넷이 많은 장점을 가지고 있음에도 불구하고 패스트 이더넷은 CSMA/CD(carrier sense multiple access / collision detection) 프로토콜을 사용하기 때문에 실시간성이 보장되지 않는다. 그러므로 패스트 이더넷으로 실시간성을 보장하기 위해서는 약간의 수정이 필요하다.

실시간성의 보장을 위하여 프로토콜 또는 하드웨어의 수정을 많이 하는 경우, 속도가 떨어지고 이더넷 본래의 좋은 특성들이 사라질 수가 있다. 또한, 약간의 수정만 한 경우, 여전히 충돌 detection을 하고 단방향의 데이터 교환만 가능한 CSMA/CD를 위한 이더넷 허브에 의존하게 된다. 따라서, 본 논문에서는 이더넷의 많은 부분을 수정하지 않고 실시간을 구현하며 양방향 통신으로 속도의 향상도 가능하게 하는 전이중 이더넷(full-duplex Ethernet)을 사용하고, 이더넷 허브나 스위치를 요구하지 않는 링형 통신망인 FER를 제안한다. 전이중 이더넷은 본래의 CSMA/CD를 매체 접근 방식으로 사용하지 않고, 일대일 연결만으로 쓰일 수 있

2. 본 론

2.1 전이중 이더넷

IEEE 802.3u 프로토콜과 이더넷은 CSMA/CD 방식을 사용한 LAN(Local Area Network) 프로토콜로서 LAN 환경에서 가장 널리 쓰이는 방식이다. IEEE 802.3u 프로토콜과 이더넷은 비슷한 방식으로 동작하고 같이 사용될 수 있기 때문에 본 논문에서는 이를 이더넷이라고 통칭하여 사용한다. 그림 1은 이더넷의 프레임 구조이다.

Preamble	Start Frame Delimiter	Destination Address	Source Address	Type /Length	Data	Frame Check Sequence
7Bytes	1Byte	6Bytes	6Bytes	2Bytes	46-1500Bytes	4Bytes

그림 1 패스트 이더넷 프레임

이더넷 프로토콜 하에서 한 스테이션이 전송을 시작하려고 하면, LAN 이 일정 시간 동안(interframe gap) 아무도 쓰지 않는지를 검사한다. 이 시간 동안 아무도 LAN을 쓰고 있지 않다면 전송을 시작하게 되는데, 전송하는 동안에도 계속 LAN 상태를 체크한다. 만약 충돌이 발생하면 스테이션은 잼 시그널(모두 1인 프레임)을 전송하고 전송을 중단한다. 그러면 스테이션은 임의의 시간동안 기다린 후(backoff) 다시 전송을 시도한다.

전송속도가 100Mbps인 패스트 이더넷의 기본적인 시간 규약은 다음과 같다.

- 한 바이트 당 0.08μs 로 전송
- 프리앰블과 시작프레임 구분문자를 합쳐 0.64μs 에 전송
- 인터프레임 갭(interframe gap)의 최소값은 0.96μs.
- 슬롯 타임은 5.12 μs

전이중방식의 이더넷은 일반적인 이더넷과 작동방식이 다르다. 전이중 링크의 끝에 물리게 되는 각각의 장치들은 동시에 데이터를 주고 받을 수 있다. 이러한 방법의 장점 중 하나는 이론적으로 두 배의 전송 능력을 가지게 된다는 점이다. 대신 전이중 방식은 링크의 끝에 물리는

장치가 하나밖에 될 수 없다는 단점을 가진다. 그러므로 전이중 방식으로는 한 채널에 여러 개의 장치를 묶을 수 없게 된다. 대신 이러한 방식에서는 데이터 전송시 충돌이 일어나는 상황을 고려할 필요가 없다.

100BASE-FX는 전이중 방식을 지원하고 광케이블을 사용한다. 전이중 방식의 광케이블 링크를 사용하면 일반적인 100BASE-FX가 허용하는 것보다 훨씬 긴 링크를 사용할 수 있다. 전이중 방식에서는 데이터 전송시의 충돌을 고려할 필요가 없기 때문이다. 충돌 검사를 할 필요가 없을 경우 전이중 광케이블 링크를 사용하면 2킬로미터 정도까지 링크의 길이를 늘릴 수 있다.

2.2 TCS의 구조

일반적인 패스트 이더넷의 MAC 구조로는 실시간성을 만족시킬 수 없다. 그러므로 단순화된 토큰 패싱 방법을 사용하고, 데이터를 미리 스케줄링함으로써 실시간성을 만족시킨다. 또한 허브 같은 부가적인 장치를 배제하기 위해 네트워크 토폴로지를 링형으로 한다. 이러한 개념을 구현하기 하기 위해 TCS(Topology Conversion Switch)를 구현한다. 그림 2는 TCS의 구조를 나타낸 것이다.

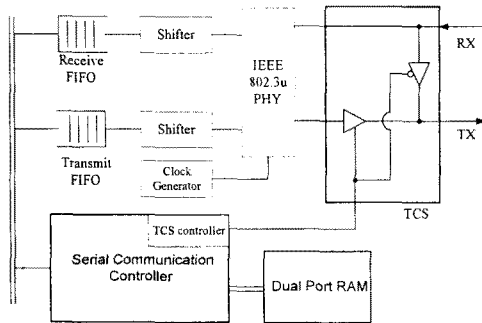


그림 2 TCS의 블록 다이어그램

TCS 컨트롤러는 스테이션이 전송권한을 가지고 전송을 할 때만 1을 출력하고 다른 상태에서는 0을 출력한다. TCS는 IEEE802.3u 표준 프로토콜의 물리 매체에 직접 연결되며 자신이 전송할 때를 제외하면 송신과 수신 라인을 연결해줌으로써 버스 형태의 접근이 가능하게 한다. IEEE802.3u는 데이터나 에러 등을 Tx, Rx 라인에 내보내 주며, 전이중 방식이므로 충돌 검사(Collision Detection) 등은 출력하지 않는다. 아래 그림 3은 이러한 방식으로 연결된 FER 네트워크를 나타낸 것이다. 겉으로 보기에는 링 토폴로지처럼 보이지만, 실제로는 버스형 네트워크처럼 동작하게 된다. 버스형 네트워크는 브로드캐스팅에서 장점을 가지게 되는데, 링 네트워크에서는 모든 스테이션이 모든 프레임의 복사본을 받아서 읽고 다음 스테이션으로 프레임을 전달하게 되어 있어 딜레이가 커진다. FER은 링네트워크가 가진 브로드캐스팅 딜레이를 보상하기 위해 내부적으로는 버스형으로 동작하도록 구성되었다. FER 네트워크를 전체적으로 나타내면 그림3과 같다.

2.2 FER 아키텍처

FDDI, IEEE802.4, Profibus 같은 실시간 통신 프로토콜을 구현하기 위해 토큰 프로토콜을 사용한다. 토큰 프레임의 부가적인 전송으로 인한 오버헤드를 줄이기 위하여 마지막 프레임의 보낼 때 그림 4와 같이 프레임 헤더의 Type/Length 필드를 이용하여 토큰임을 표시해두도록 한다.

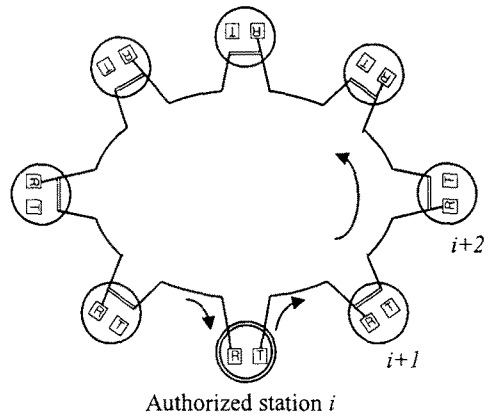


그림 3 여러 스테이션이 연결된 전체 FER 네트워크

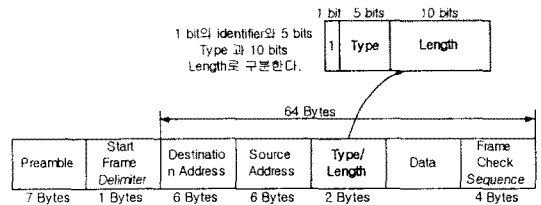


그림 4 토큰 프레임의 구조

아래는 FER 네트워크에서 데이터가 전송되는 프로세스를 나타낸 것이다.

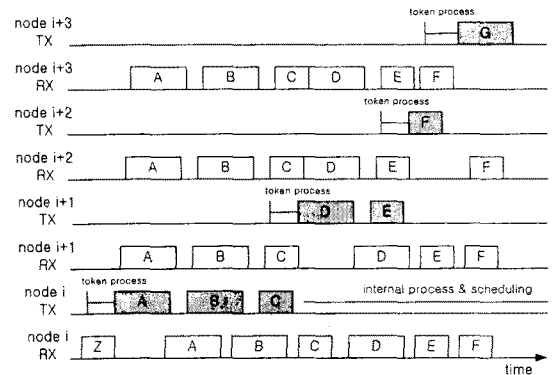


그림 5 데이터 전송 프로세스

먼저 노드 i가 토큰을 받아 토큰임을 인식하면 자신이 보내고 싶은 데이터 A, B, C를 전송하게 되며, 마지막 프레임인 C를 보낼 때 토큰임을 표시하여 브로드캐스팅하고, 노드 i+1은 소스 주소와 자신의 주소를 비교하여 자신이 전송 권한을 가지게 되었음을 알게 된다. 노드 i+1은 자신이 보낼 데이터인 D, E를 전송하고 E 프레임에 토큰임을 적어서 브로드캐스팅한다. E 프레임에 실린 토큰을 인식한 노드 i+2는 소스 주소와 자신의 주소를 비교하여 자신이 전송 권한을 가졌음을 알게 되며 자신이 전송할 데이터가 하나일 경우에는 자신이 보낼 데이터인 F에 바로 토큰을 실어서 전송한다. 다음 노드인 노드 i+3도 토큰을 인식하고 자신이 보내고자 하는 데이터를 보내게 된다.

2.3 분석

FER 네트워크의 성능에 대한 분석을 실시한다. FER 네트워크는 다음과 같은 파라미터를 가질 수 있다.

- P_i : 노드 i에서의 실시간 데이터 양
- Q_i : 노드 i에서의 비실시간 데이터 양
- 전송 속도 : 100Mbps/sec
- T_b : 전송시 한 비트당 걸리는 시간
- N : 스테이션 개수
- D_p : 전달 지연(propagation delay)
- OH : 헤더
- CRC : CRC 길이
- F_d ($F_{d_max} = 1.5Kbytes$) : 전송 프레임 데이터 길이
- D_{fm} : 메모리에서 데이터를 읽어오는 지연시간
- D_d : 데이터 프로세싱 딜레이
- D_{oe} : 광전 변환 딜레이
- D_{eo} : 전광 변환 딜레이
- L_i (L_{max}) : 노드 i와 i+1 사이의 케이블 길이
- D_{tcs} : TCS 처리 딜레이
- T_{up} : 업데이트 주기

위의 같은 파라미터를 가지며 노드 I가 자신이 전송 권한을 가졌음을 인식하고 데이터를 전송하는 평균 시간 T_{H_i} 는

$$T_{H_i} = D_{tcs} + T_{tx} \times m_i + D_d \times (m_i - 1) + (D_{eo} + D_p^i + D_{oe})$$

여기서

$$m_i = \lceil \frac{P_i + Q_i}{F_d} \rceil, T_{tx} = (F_d + OH + CRC)T_b + D_{fm}$$

$$D_p^i = \frac{L_i}{\gamma c}$$

즉, TCS 스위치에서의 딜레이와 보내고자 하는 데이터를 처리하여 전송하는데 걸리는 시간 및 전광 및 광전 변환 시간과 케이블에서의 전송 지연을 합한 값이다. 토큰 프레임은 일반 데이터 프레임에 포함되므로 위의 시간 계산에서 포함되지 않는다. 각 노드가 모두 전송할 데이터가 있다고 가정하면, 노드 개수가 N 이므로 토큰이 전체 노드를 지나 다시 원래 노드까지 돌아오는데 걸리는 시간인 토큰 회전 시간(Token Rotation Time, TRT)는

$$TRT = \sum_{i=1}^N T_{H_i}$$

로 표현된다. 여기서 P_i 와 Q_i 그리고 N 을 제외한 나머지 값들은 모두 실험을 통하여 값을 측정할 수 있으므로 상수 값이 된다. F_d 는 이더넷이 허용하는 최대값인 1.5KB보다 데이터가 클 때는 1.5KB가 되며 그렇지 않을 마지막 프레임에서는 1.5KB이하의 값을 가지게 하며, T_b 는 전송속도의 역수이다.

이럴 때, 본 네트워크의 실시간성은 위의 TRT 값이 업데이트 주기인 T_{up} 보다 작을 때 만족된다.

$$T_{up} \geq TRT = \sum_{i=1}^N T_{H_i}$$

$$+ \sum_{i=1}^N (D_{tcs} - D_d + D_{eo} + D_p^i + D_{oe})$$

$$= (T_{tx} + D_d) \sum_{i=1}^N \lceil \frac{P_i + Q_i}{F_d} \rceil \quad 30$$

그러므로, FER에서는 위의 식에 의해 미리 주어진 데이터 양을 이용하여 실시간성이 만족되는 지를 확인해보는 Configuration tool을 통해 실시간성을 만족시킬 수 있는지 체크해볼 수 있다.

3. 결 론

본 논문에서는 전이중 방식의 이더넷을 이용한 실시간 네트워크인 FER의 구조를 제시하였다. 일반적으로 많이 쓰이는 이더넷은 실시간성을 가지지 못하지만, 일대일 방식의 전송에서만 쓰이던 전이중 방식의 이더넷을 사용하고 TCS 라는 부가적인 하드웨어 장치를 이용하여 실시간성을 보장할 수 있도록 하는 네트워크 아키텍처를 제시하였다. TCS는 링형 토폴로지의 네트워크가 브로드캐스팅할 때 딜레이가 커진다는 단점을 보완하여, 데이터 전송 시에 버스형 토폴로지로 변환되게 하는 하드웨어 장치이다. 또한 네트워크가 처리해야하는 데이터 양과 스테이션의 개수를 알 때, 수학적으로 실시간성의 보장 여부를 판별할 수 있다. 앞으로는 FER네트워크에서 데이터를 배분하고 스케줄링하는 방법에 대한 연구가 필요하다.

[참 고 문 헌]

- [1] M. Conti, L. Donatiello, M. Furini, "Design and Analysis of RT-Ring : a protocol for supporting real-time communicatins", IEEE International Workshop on Factory Communication Systems, Proceedings, pp91-98, 2000
- [2] Zhou Qiang, Luo Zhiqiang, Xiong Huangang, Li Qiao, "Real-time performance analysis for linear token passing bus networks", 25th Annual IEEE Conference on Local Computer Networks, LCN2000, pp187-193, 2000