

논문 2011-48SC-4-10

원전용 실시간 제어망을 위한 실시간 이더넷 기술의 마스터 이중화 기법

(Redundancy Method for Industrial Real-time Ethernet for NPPs)

윤진식*, 김윤섭**, 김동성***

(Jin-Sik Yun, Yun-Seop Kim, and Dong-Sung Kim)

요약

본 논문에서는 이더넷 파워링크의 마스터 이중화 기법의 실시간성 향상을 위해 PReq 신호를 이용한 원전용 실시간 제어망의 실시간성과 신뢰성을 고려한 마스터 이중화 기법을 제안하였다. 제안된 마스터 이중화 기법은 동기 구간에서 PReq 신호를 이용하여 마스터 고장을 감지하고 비동기 구간에서 AMNI 프레임 전송하여 단위 사이클 구간 앞서서 전환이 가능하다. 이를 통해 실시간 주기 데이터의 손실 및 이로 인한 문제점들을 최소한으로 줄일 수 있다. 제안된 마스터 이중화 기법의 효용성을 증명하기 위하여 OPNET Modeler를 이용하여 성능분석 및 검증 실험을 수행하였고 이를 통해 마스터 전환시간을 줄일 수 있음을 보였다.

Abstract

This paper proposes a reliability enhancement of industrial real-time Ethernet using master redundancy method for NPPs(Nuclear Power Plants). In this paper, Ethernet Powerlink is investigated for distributed control systems for NPPs considering real-time and reliability performance. The proposed method can reduce a master switch-over time using PReq signal when Ethernet Powerlink master(Managing Node) failure was occurred. Using the OPNET simulation results, the performance enhancement of master switch-over time of Ethernet Powerlink is verified for NPPs.

Keywords : NPPs(Nuclear Power Plants), Industrial real-time Ethernet, Redundancy method.

I. 서론

산업용 이더넷 기술은 저가 및 고효율의 장점과 유지보수의 편리성 등의 이유로 필드버스를 대체하여 그 응용범위를 넓혀가고 있다^[1,3]. 원전의 MMIS(Man Machine Interface System) 계통에 적용되는

I&C(Instrument and Control) 설비 중의 하나인 DCS(Distributed Control System)에 산업용 이더넷의 적용가능성이 연구되고 있다^[2].

산업용 이더넷을 원전용 분산제어 네트워크에 적용하기 위해서는 실시간성과 신뢰성 및 이중화 등의 요구사항을 만족해야 한다^[2,3]. 특히 분산제어 시스템은 대형의 플랜트 형태로 구성됨에 따라 제어기의 수가 증가하고 각종 제어기의 제어주기가 짧아지고 있기 때문에 고속의 산업용 이더넷의 도입은 필수적이다. 특히 원전의 경우, 결합에 의한 원전 사고가 발생하면 인적, 물적으로 예측하기 어려운 피해를 초래하므로 고신뢰성과 실시간성의 보장이 필요하다. 또한 분산제어 네트워크의 신뢰성 향상을 위해 마스터 고장 감지 기법 및 실시

* 학생회원, *** 정회원, 금오공과대학교 전자공학부

(School of Electronic Engineering, Kumoh National Institute of Technology)

** 정회원, 알에스오토메이션 연구원

(RS Automation)

※ 본 과제(결과물)는 교육과학기술부의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 광역경제권 선도산업 인재양성사업의 연구결과입니다.

접수일자: 2011년3월23일, 수정완료일: 2011년6월10일

간 데이터 손실을 최소화하는 기법이 요구된다.

본 논문에서는 이러한 요구사항 들을 만족하는 산업용 이더넷의 적용 가능성을 조사하고 개선 기법을 분석했다. 분석을 통해 Ethernet Powerlink^[4]의 신뢰성 향상을 위해서 PReq(Poll Request) 신호를 이용한 마스터 이중화 기법을 제안하였다. 또한 OPNET Modeler를 이용한 모의실험을 통해 제안된 기법의 효용성을 증명하였다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. II장에서는 기존 원전용 네트워크 기술의 특징에 대해 기술한다. III장에서는 Ethernet Powerlink의 기술 개요와 함께 Ethernet Powerlink 기반 원전용 분산제어 네트워크 설계시의 문제점을 기술한다^[4]. IV장에서는 Ethernet Powerlink 마스터 이중화 기법의 문제점과 PReq 신호를 이용한 마스터 이중화 기법을 기술한다. V장에서는 제안된 Ethernet Powerlink 기반 분산제어 네트워크의 모의실험을 통해 PReq 신호를 이용한 이중화 기법의 성능을 평가하였다.

II. 원전용 분산제어 네트워크의 문제점 분석

그림 1은 원전용 분산제어 시스템의 계층적 구조를 나타낸다.

원전용 분산제어 네트워크는 고신뢰 시스템, 이중화 및 자기진단 기능 및 최대 허용지연 시간의 보장 등의 요구사항 들을 만족해야 한다. 이를 만족하기 위해 그림 2와 같은 프로토콜들을 사용한다.

그림 2에서 Class A는 프로세스 통신을 위해 표준 이더넷 하드웨어와 TCP/IP 소프트웨어 스택이 사용된다. 성능 향상을 위해 상위 프로토콜이 개선될 수 있다.

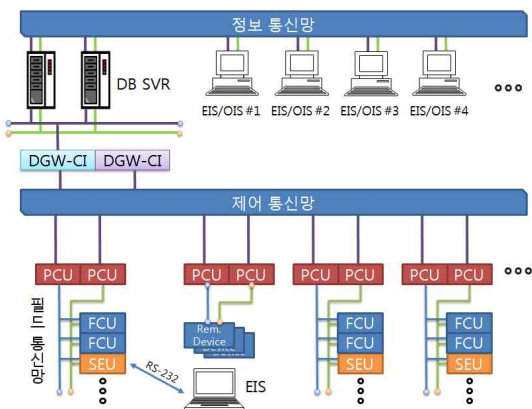


그림 1. 원전용 분산제어 시스템의 구조
Fig. 1. Structure for DCS of NPPs.

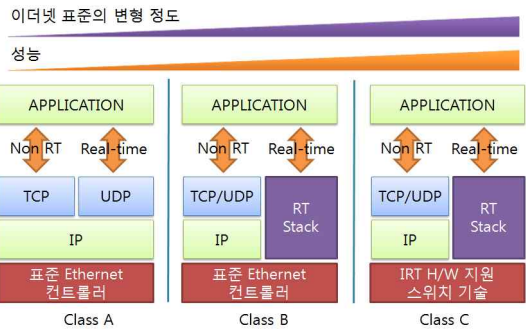


그림 2. 산업용 이더넷 프로토콜의 분류
Fig. 2. Classification of industrial Ethernet.

실시간 성능은 스위치 허브에서 발생하는 예측 불가능한 지연으로 제한되어질 수 있는 단점이 있다. Modbus/TCP, Ethernet/IP 등이 Class A에 해당된다.

Class B도 표준 이더넷 하드웨어를 사용하지만 프로세스 통신을 위해 TCP/UDP/IP를 사용하지 않는다. Class B는 별도의 실시간 프로토콜 스택을 사용하고 실시간으로 스케줄링 기법을 사용하여 이더넷 프레임 제어한다. 비 실시간 데이터의 경우 TCP/UDP/IP도 이용가능하다. Ethernet Powerlink와 Profinet RT가 Class B에 해당된다.

Class C는 특수기능이 추가된 이더넷 하드웨어와 고성능 스위치 장치를 사용하며 프로세스 통신을 위해 TCP/UDP/IP를 사용하지 않는다. 별도의 실시간 프로토콜 스택을 사용하여 시간에 따른 스케줄링 기법을 사용하여 이더넷 프레임을 제어한다. 뛰어난 실시간 성능을 가졌지만 TCP/IP를 이용한 인터넷 기술을 사용할 수 없다는 단점을 가지고 있다. Profinet IRT, EtherCAT, SERCOS III 등이 Class C에 해당된다.

원전용 분산제어 네트워크의 요구사항 들을 기준으로 산업용 이더넷 들을 표 1, 2에 분석하였다.

표 1. 산업용 이더넷의 실시간 특성^[6]
Table 1. Real-time feature of industrial Ethernet^[6].

Protocol	Scheduling of real-time traffic	Real-time class
Modbus/TCP	On top of UDP	1
Ethernet/IP	On top of TCP/IP	3
Ethernet Powerlink	On top of MAC	3
Profinet	On top of MAC	3
EtherCAT	On top of MAC	3

1 : Soft RT [cycle time up to 10ms],
2 : Hard RT [cycle time 1-10ms],
3 : Isochronous RT [cycle time 250µs-1ms, jitter less than 1µs]

표 2. 산업용 이더넷의 이중화 기법 비교
Table 2. Redundancy methodology of industrial real-time Ethernet.

프로토콜	이중화 기법
Modbus/TCP	switches with spanning tree
Ethernet/IP	switches with spanning tree + Device Level Ring
Ethernet Powerlink	Cable redundancy
Profinet	switches with spanning tree
EtherCAT	Cable redundancy

Modbus/TCP는 Real-time class 1과 UDP에서의 실시간 스케줄링 등 실시간 성능 및 프로토콜 구현의 복잡성, 스위치 기반의 이중화 기법의 사용 등으로 인해 원전용 분산제어 네트워크에 적합하지 않았다. Ethernet/IP는 실시간 성능은 적용가능하나 CIP 기반의 프로토콜 구조와 스위치 및 디바이스에 의한 이중화 기법을 사용하여 실시간성과 마스터 이중화에 대한 추가적 연구 등이 필요할 것으로 고려된다.

Profinet과 EtherCAT은 Real-time class 3의 실시간 성능이 장점이나 특별한 이더넷 하드웨어와 고성능 스위치의 사용으로 인한 프로토콜 최적화 등의 어려움이 있다. Profinet은 스위치를 사용한 트리 구조 형식을 이용하고, 40ms의 고장 복구기능을 가지고 있지만 원전 환경에서는 스위치로 인한 지연이 야기될 수 있다.

산업용 이더넷으로 Real-time class 3인 동시에 Class B타입의 Ethernet Powerlink의 경우 원전용 분산제어 네트워크 요구사항 들을 동시에 만족해 원전에 적용된 사례들이 연구되어지고 있다.

III. 원전시스템을 위한 산업용 이더넷: Ethernet Powerlink

1. Ethernet Powerlink의 데이터 전송 기법

그림 3은 Ethernet Powerlink의 사이클을 나타낸다. Ethernet Powerlink의 사이클은 시작 구간(Start Phase), 동기 구간(Isochronous Phase), 비동기 구간(Asynchronous Phase)과 유휴 구간(Idle Phase)으로 나누어진다.

Ethernet Powerlink의 동기 구간에서는 실시간 주기 데이터 전송이 이루어지고, 비동기 구간에서는 모든 종류의 데이터 전송이 이루어진다.^[7]

MN(Managing Node, 관리 노드)으로부터 SoC(Start

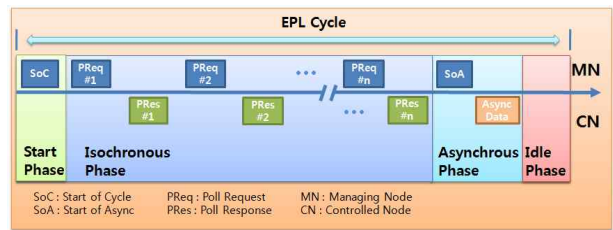


그림 3. Ethernet Powerlink의 전송 사이클
Fig. 3. Ethernet Powerlink transmission cycle.

of Cycle) 프레임이 네트워크상의 모든 노드에게 전송되어지면 동기화가 시작된다.

전송 기법을 분석하기 위한 시작 구간은 식 (1)과 같다.

$$T_{SP} = T_{SF} + T_{RSF} \quad (1)$$

(T_{SP} : Start Phase, T_{SF} : SoC Frame, T_{RSF} : React SoC Frame)

동기화가 완료되면 MN은 각각의 노드에게 순차적으로 PReq 프레임을 전송하고 PRes(Poll Response) 프레임 수신하며 데이터 송수신이 이루어진다. 동기 구간은 식 (2)와 같다.

$$T_{IP} = N(T_{PP_{Rq}} + T_{PP_{Rs}} + T_{RP_{Rq}} + T_{RP_{Rs}}) + 2N \times L_{IF} \times T_{Byte} \quad (2)$$

(T_{IP} : IsoC Phase, T_{IF} : IsoC Frame, $T_{PP_{Rq}}$: Propag_PReq, $T_{PP_{Rs}}$: React_PReq_PRes, $T_{RP_{Rq}}$: Propag_PRes, $T_{RP_{Rs}}$: React_PRes_PReq)

동기구간이 끝나고 MN이 SoA(Start of Async) 프레임을 전송하면 비동기 구간이 시작된다. 비동기 구간에서는 MN에 의해 스케줄링 되어 전송 권한을 가진 노드(MN을 포함)가 비동기 데이터를 전송한다. 비동기 구간은 식 (3)과 같다.

$$T_{AP} = T_{SAF} + T_{PSAF} + T_{RSAAS} + T_{ASF} + T_{PAS} \quad (3)$$

(T_{AP} : Async Phase, T_{SAF} : SoA Frame, T_{PSAF} : Propag SoA Frame, T_{RSAAS} : React SoA ASnd, T_{ASF} : ASnd Frame, T_{PAS} : Propag ASnd)

유휴 구간은 ASnd(Asynchronous Send) 프레임의 끝부터 SoC 프레임 사이 구간이며 식 (4)와 같다.

$$T_{Idle} = T_{RAAS} \quad (T_{RAAS}: React ASnd SoC) \quad (4)$$

Ethernet Powerlink의 통신 사이클은 식 (5)와 같다.

$$T_{EPLC} = T_{SP} + T_{IP} + T_{AP} + T_{Idle} \quad (5)$$

(T_{EPLC} : EPL Cycle, T_{SP} : Start Phase, T_{IP} : IsoC Phase, T_{AP} : Async Phase, T_{Idle} : Idle Phase)

2. Ethernet Powerlink 마스터 이중화 기법의 분석

Ethernet Powerlink의 이중화 모델은 그림 4와 같이 2개 이상의 노드들에 기반을 둔다^[4]. RMN(Redundant Managing Node) 중 하나는 AMN(Active Managing Node)으로 동작하고 다른 노드들은 SMN(Stand-by Managing Node)으로 남아 AMN을 감시하는 구조가 된다.

Node ID[1~239]는 CN(Controlled Node)에 할당되고 Node ID[241~250]은 RMN에 할당된다. Node ID[241~250]은 구성 툴이 RMN 우선순위를 관리하지 않는 경우에 Node ID를 이용한 우선순위로 사용한다.

Ethernet Powerlink에는 Node ID가 240인 하나의 MN만을 허용하기 때문에 AMN은 이중화 설계를 위하여 가상 관리 노드를 사용하며 자신의 Node ID 외에 추가적으로 Node ID가 240인 가상 ID를 사용하여야 한다.

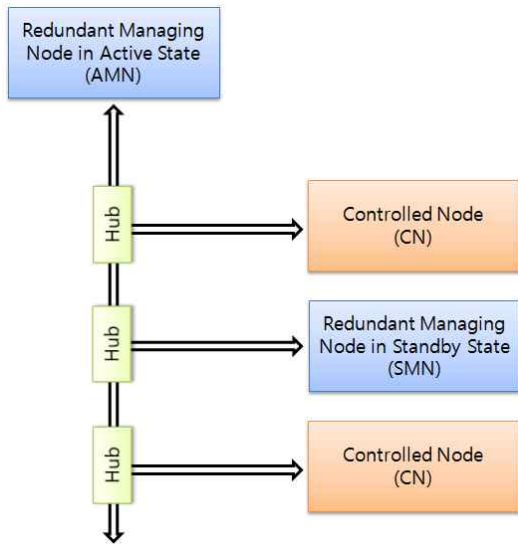


그림 4. 기존 마스터 이중화의 구조^[4]
 Fig. 4. Structure of existing master redundancy^[4].

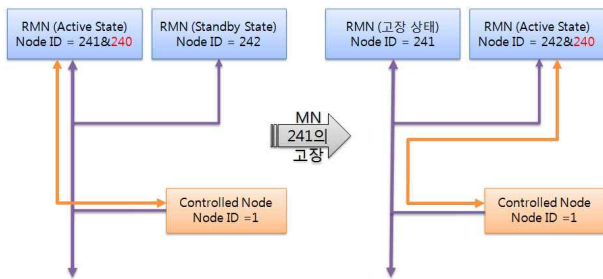


그림 5. AMN의 고장 시 가상 관리 노드 ID의 전환^[4]
 Fig. 5. Switch of Flying Managing Node ID when AMN failure was occurred^[4].

표준 노드들을 위해 RMN은 활성/대기 상태 기법을 이용해 대기한다. 따라서 하나의 활성화 MN만이 주어진 시간에 Node ID가 240으로 보이게 된다. AMN 고장 시 관리자 노드 ID의 전환은 그림 5와 같이 나타낸다.

Ethernet Powerlink의 이중화 기법의 핵심은 SMN이 AMN 기능을 대신 수행하는 것이다. 고장복구 후 모든 CN들이 정상 작동하는 것이 보장되어야 하므로 마스터 전환 기간에 RMN들은 동작상태 및 동기화를 유지해야 한다.

RMN이 AMN의 기능을 대신할 때는 초기화 절차를 거치지 않으므로 RMN은 SMN에서 연결된 CN들을 감시하는 기능이 포함된다. 또한 MN내의 시간 발생기의 동기화는, AMN을 복구하는 동안 대기 단계에서 발생해야 하며, SoC 타임 스탬프는 동기화 되어져야 한다.

Ethernet Powerlink에서 AMN은 MN으로 동작될 수 있으며 비동기 및 동기통신이 가능해야 한다. CN들은 한 사이클 이내에 구성되어야 하며 AMN의 전송실패감지는 SoC 및 SoA의 수신여부에 따른다.

그림 6은 RMN의 NMT(Network Management) 상태 다이어그램이다. 네트워크 상태에 따른 RMN의 상태 변화를 나타내며 SoC와 SoA 신호의 감지에 따른 SMN과 AMN의 전환을 나타내고 있다.

초기 상태에서 SoC와 SoA 신호를 수신하면 대기 단계로 동작하고, 미수신의 경우 활성 단계가 된다. AMN이 된 마스터는 다음 사이클부터 SoC 프레임 전송을 알리는 AMNI(Active Managing Node Indication) 프레임 보냄으로써 다른 RMN이 AMN으로 전환하는 것을 방지한다.

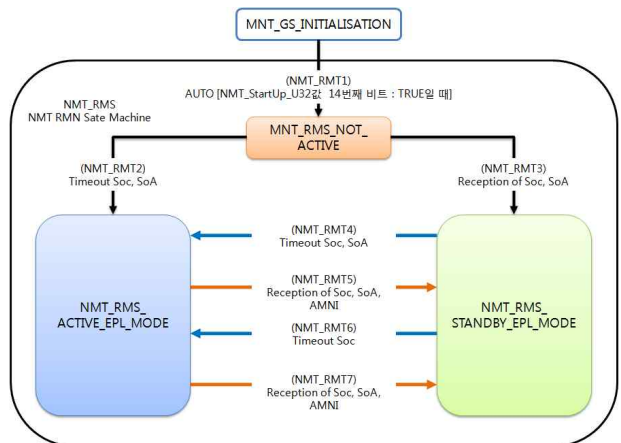


그림 6. RMN의 NMT 상태 다이어그램^[4]
 Fig. 6. NMT state diagram of RMN^[4].

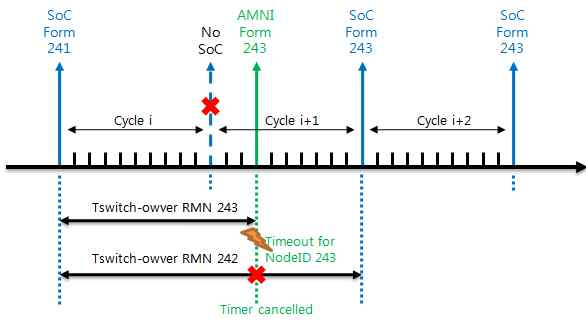


그림 7. 마스터 전환의 예^[4]
Fig. 7. Example of master switch-over^[4].

Ethernet Powerlink의 마스터 전환의 예는 그림 7과 같다.

Node ID가 241~243인 3개의 RMN이 경쟁할 때, Node ID 241이 AMN으로 동작하는 중 고장으로 인한 전환이 일어날 때 전환 시간은 다음과 같이 계산한다.

$$T_{So,MN} = T_{EPL_cycle} + \frac{T_{EPL_cycle} * (MN_{SOP} + MN_{SOD})}{MN_{SOC D}} \quad (6)$$

$$(T_{So,MN} : T_{Switch_over_MN})$$

여기서, T_{EPL_cycle} 은 Ethernet Powerlink의 전체 사이

표 3. 마스터 전환 시의 $T_{So,MN}$ 값
Table 3. $T_{So,MN}$ in master switch-over.

Node ID	$T_{So,MN}$ (μs)
242	3139.3
243	3767.2

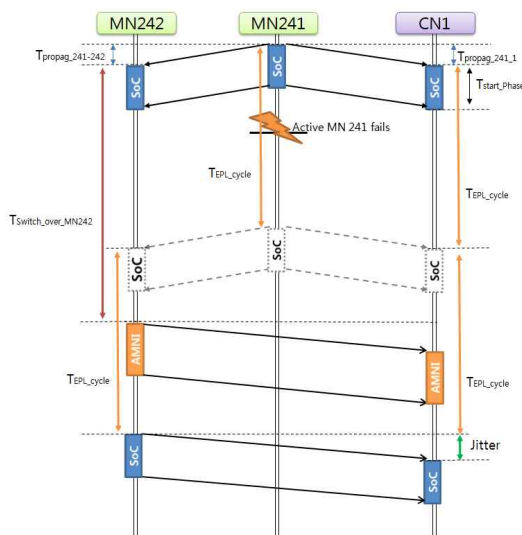


그림 8. 동기화 구간에서 마스터 전환 타이밍^[4]
Fig. 8. Timing of master switch-over in asynchronous phase^[4].

클 시간이며, MN_{SOP} 는 마스터 전환의 우선순위로 Node ID 240으로 지정된다. MN_{SOD} 는 전환 지연 값이며, $MN_{SOC D}$ 는 RMN의 수를 나타낸다.

35개의 CN과 3개의 RMN 그리고 100Mbps 속도의 매체가 있다면 식 (5)의 T_{EPL_cycle} 은 1883.6 μs 로 계산되어진다. 이를 식 (6)에 대입하면 $T_{So,MN}$ 은 표 3과 같은 값을 가진다.

그림 8은 기존 Ethernet Powerlink의 마스터 전환 타이밍을 나타낸다. MN 241에서 고장이 감지되면 RMN 242가 마스터 전환되어 AMN이 되고, 다른 RMN에 AMNI 프레임을 전송한다. AMNI 프레임을 전송 받은 RMN들은 SMN으로 동작한다.

IV. Poll Request 신호를 이용한 마스터 이중화 기법

Ethernet Powerlink의 마스터 이중화 기법은 마스터 고장 감지를 위해 SMN이 SoC 및 SoA 신호들을 이용한다. 이로 인해 그림 8과 같이 마스터 복구를 위한 추가 사이클 타임이 필요하다. 239개의 CN으로 구성된 네트워크의 경우 마스터를 복구하는 동안 239~477(238+239)개의 주기 데이터 손실이 발생한다. 마스터의 고장 감지에 이용되는 신호는 표 4와 같다.

SoA 프레임 전송 이후 마스터 고장이 발생하면 SoA 신호를 통해 고장을 감지한다. 여기서 마스터 고장으로 인해 마스터가 전환되는 시점은 고장 발생 전의 사이클 타임에서 n번째가 되는 사이클 타임의 SoC 프레임이 발생하는 시간과 동일해야한다는 것이다. 그림 9는 마

표 4. 마스터 고장감지가 가능한 신호 분류
Table 4. Detectable signal of master failure.

고장감지 대상 신호	감지 기법
SoC	타임 아웃 신호 감지
SoA	타임 아웃 신호 감지
PReq(Poll Request)	타임 아웃 신호 감지

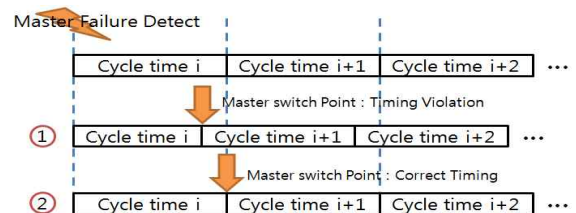


그림 9 마스터 전환 타이밍의 예
Fig. 9. Example of master switch-over timing.

스터 전환 타이밍의 예를 나타낸다.

그림 9의 ①번과 같이 전환 시간을 줄이기 위해 사이클 타이밍을 고려하지 않고 고장 감지 직후 마스터 전환을 할 경우, 시간 위반(Timing Violation)으로 인해 시스템이 작동하지 않게 된다. 이를 방지하기 위해 ②번과 같이 마스터 전환은 다음 사이클 타이밍의 시작을 기다려야 한다.

기존의 마스터 이중화 기법은 SoC 및 SoA를 통해 마스터 고장을 감지하기 때문에 고장 발생 시점의 다음 사이클에서 이상을 감지하고, 그 다음 사이클에서 마스터가 전환된다. 전체 전환 타이밍의 시간을 줄이기 위해서 마스터 고장이 일어난 사이클에서 고장을 감지하는 즉시 마스터를 전환할 필요가 있다. 그래서 본 논문에서는 PReq 신호를 이용한 고장감지 기법을 고려했다.

Ethernet Powerlink에서는 대기중인 RMN이 SoC 및 SoA 신호를 이용하여 마스터 고장을 감지한다.

그러나 SoC 또는 SoA 신호 직후에 마스터 고장이 발생한 경우에는 다음 신호까지 고장감지를 기다려야 하는 단점이 있다. 이러한 단점을 극복하기 위해 PReq 신호를 이용하여 고장을 감지하고 각 노드에 SoA 프레임과 AMNI 프레임을 차례로 전송하는 기법을 제안한다. PReq 신호를 이용하면 비동기 구간에서 마스터 전환 후 9바이트의 AMNI 프레임 전송을 위한 나머지 사이클 시간을 활용할 수 있다.

그림 10에 제안된 마스터 이중화의 RMN 상태 다이어그램을 나타내었다. 동작중인 RMN 중에서 우선순위가 높은 RMN이 활성화 되어 AMN이 되고 나머지 RMN들은 SMN이 된다. SMN은 동기 구간에서만 네트

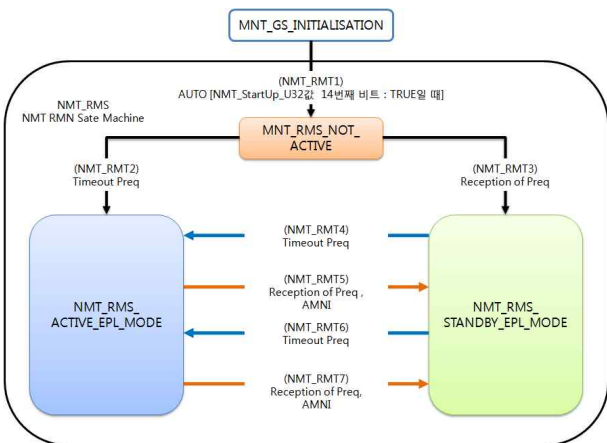


그림 10. 제안된 마스터 이중화의 RMN 상태 다이어그램
Fig. 10. NMT state diagram of RMN in proposed master redundancy.

워크의 상태를 모니터링 하다가 PReq 프레임을 감지하지 못하면 마스터 전환을 한다.

비동기 구간에서 마스터 고장을 감지하면 마스터의 전환이 다음 주기로 넘어가게 되기 때문에 비동기 구간에서는 마스터 고장 감지를 하지 않는다.

제안된 마스터 전환 시간은 식 (7)과 같이 계산되어질 수 있다.

$$T_{So,MN} = T_{IP} + \frac{T_{IP} \times (MN_{SoP} + MN_{SoD})}{MN_{SoCD}} \quad (7)$$

($T_{So,MN}$: $T_{Switch_over_MN}$, T_{IP} : $T_{Is.C_Phase}$, MN_{SoP} : $Switch_over_Priority$, MN_{SoD} : $T_{Switch_over_Delay}$, MN_{SoCD} : $Switch_over_Cycle_Divider$)

기존 마스터 전환 시간 계산과 같은 조건으로 계산하면 식 (7)은 표 5와 같은 값을 가진다.

그림 11은 제안된 마스터 이중화를 위한 전환 타이밍을 보여준다.

제안된 마스터 이중화는 동기 구간에서 PReq 신호를 이용하여 마스터 고장을 감지하고, 비동기 구간에서 AMNI 프레임을 전송한다. 따라서 한 사이클 타임(마스터 전환의 예에서 1883.6 μ s) 빨리 전환이 가능해 마스터 전환에 의한 실시간 주기 데이터의 손실이 적다.

표 5. 제안된 마스터 전환 예의 $T_{Preq_Switch_over_MN}$ 값
Table 5. The value of $T_{Preq_Switch_over_MN}$ of the proposed method.

Node ID	$T_{Preq_Switch_over_MN}$ (μ s)
242	1165.7
243	1748.6

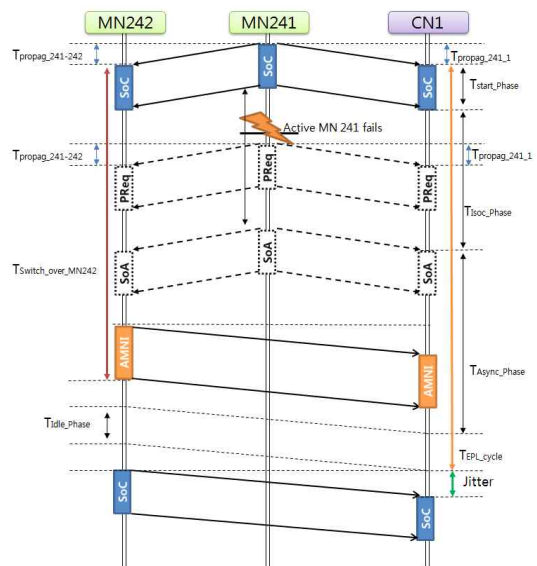


그림 11. 제안된 마스터 전환 타이밍
Fig. 11. Timing of proposed master switch-over.

결과적으로 기존 원전용 분산제어망인 토큰버스 기반의 필드버스 AF 100(Advant Fieldbus 100)의 버스 마스터 전환 감지 기준인 20ms에 비해 향상된 성능을 가질 수 있다.

V. 모의실험을 통한 성능측정

이중화 기법의 성능 측정을 위해 OPNET Modeler ver 16.0를 이용하여 모의실험 환경을 구축하였다. 이를 이용하여 네트워크 이용률, 패킷 처리율 및 데이터 전송의 지연시간 등을 분석하였다. 모의실험을 통해 마스터 이중화에서 마스터 전환 타이밍에 따른 마스터 전환 시간의 차이를 분석했다.

1. 모의실험 환경

모의실험 환경은 1000×1000m² 영역에 위치한 15개의 CN과 2개의 RMN으로 구성되어 있다. CN의 Node ID는 AMN에 의하여 자동으로 할당되며, RMN의 Node ID는 241~243으로 할당했다. 매체는 100BASE-FX로 설정하였다.

모의실험 환경을 위해 10초 경과 후 AMN으로 동작하고 있는 RMN 241에 고장이 발생하고, 네트워크는 동작하지 않게 되는 시나리오를 적용했다. SMN으로 동작하고 있는 RMN 242는 SoC 프레임과 SoA 프레임의 타임아웃을 이용하여 마스터의 고장을 감지하고, 고장이 감지된 후에 마스터 전환이 이루어지게 된다.

기존의 RMN의 마스터 전환 시간과 제안된 이중화 기법의 마스터 전환 시간을 비교하기 위해 동일한 실험 환경에서 RMN 모델만 바꿔 진행한다.

*(RMN 241) Attributes	
Attribute	Value
name	RMN 241
model	Boffo_powerlink_Manager
ELP CYCLE TIME	0.001
MN Switch Over Cycle Divider	10
MNS Switch Over Delay	0
RMN NODE ID	241

*(RMN 242) Attributes	
Attribute	Value
name	RMN 242
model	Boffo_powerlink_Manager
ELP CYCLE TIME	0.001
MN Switch Over Cycle Divider	10
MNS Switch Over Delay	10
RMN NODE ID	242

그림 12. RMN 241 및 RMN 242의 설정
Fig. 12. Configuration of RMN 241 and RMN 242.

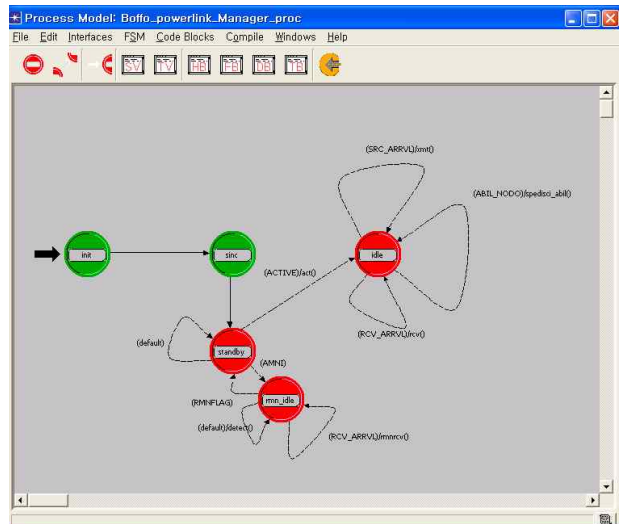


그림 13. RMN 노드의 프로세스 모델
Fig. 13. Process model of RMN node.

RMN 241 및 RMN 242의 설정은 그림 12와 같다.

RMN 241의 Ethernet Powerlink 사이클은 1ms, MN 스위치에 대한 분주 값은 10, MN 스위치에 대한 지연 값은 0, RMN Node ID는 421로 설정하였다. RMN Node ID값은 노드의 아이디로 우선순위 기반 MN 전환 값으로 사용된다.

RMN 242의 Ethernet Powerlink 사이클은 1ms, MN 스위치에 대한 분주 값은 10, MN 스위치에 대한 지연 값은 10, RMN Node ID는 242로 설정하였다.

그림 13의 RMN 프로세스 모델은^[4], MN 스위치에 대한 분주, MN 스위치에 대한 지연, RMN Node ID값에 따라 AMN 또는 SMN으로 동작한다.

모의실험은 기존의 RMN의 마스터 전환 시간의 측정과 제안된 이중화 기법의 마스터 전환 시간을 비교하기 위해 동일한 실험환경에서 RMN의 고장감지 조건을 다르게 적용하여 진행했다.

2. 마스터 전환 시간 비교

모의실험 환경을 위해 10초 경과 후 AMN으로 동작하고 있는 RMN 241에 고장이 발생하고, 네트워크는 동작하지 않게 되는 시나리오를 적용했다.

기존 기법의 경우 SoC 프레임과 SoA 프레임의 타임아웃을 이용하여 마스터의 고장을 감지하고, 제안된 기법의 경우 PReq 프레임의 타임아웃 신호를 이용하여 마스터 고장을 감지한다. 고장이 감지된 후에 마스터 전환이 이루어지게 된다.

그림 14의 좌측은 마스터 고장 발생 시 기존 기법을

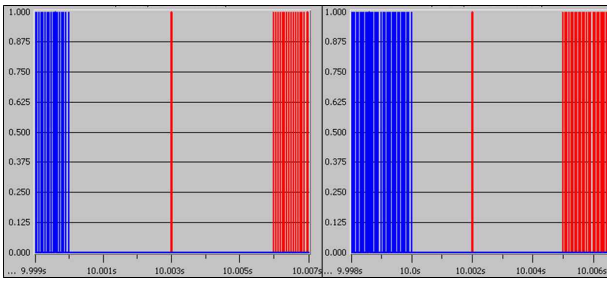


그림 14. 각각의 마스터 전환 시간 비교

Fig. 14. Master switch-over time comparison results.

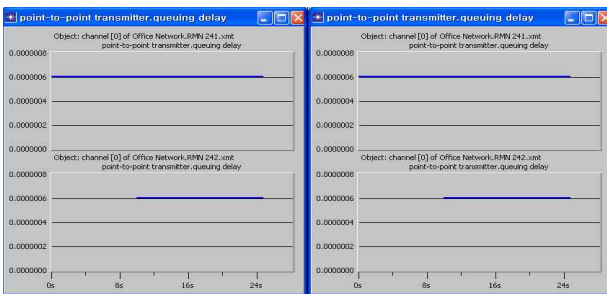


그림 15. 각각의 마스터 이중화의 지연 시간 비교

Fig. 15. Delay comparison results.

사용한 마스터 전환 시간을 우측은 제안된 기법을 이용한 마스터 전환 시간을 보여준다.

기존 기법의 경우 고장 직후 $3000\mu\text{s}$ 에서 마스터 고장을 감지하고, $6000\mu\text{s}$ 에서 RMN 242에 의한 네트워크의 재동작을 보여준다. 제안된 기법의 경우 고장 직후 $2000\mu\text{s}$ 에서 마스터 고장을 감지하고 $5000\mu\text{s}$ 에서 RMN 242에 의한 네트워크의 재동작을 보여준다.

마스터 전환 기법의 변화에 따른 네트워크 특성의 비교를 위해 그림 15에서 대기 지연을 살펴보았다.

좌측은 기존 마스터 이중화의 대기 지연을 우측은 제안된 마스터 이중화의 대기 지연을 나타내고 있다.

이러한 모의실험의 비교 결과 PReq 신호를 이용한 마스터 이중화가 네트워크 특성에 영향이 미치지 않으면서 마스터 스위칭 시간을 효과적으로 줄임을 살펴볼 수 있었다.

VI. 결 론

본 논문에서는 원전용 산업용 이더넷 기반 분산제어 네트워크의 신뢰성 향상을 위하여 PReq 신호를 이용한 마스터 이중화 기법을 제시하였다. 모의실험의 결과 마스터 전환 시간은 기존 Ethernet Powerlink 마스터 이중화 기법의 경우, $6000\mu\text{s}$ 가 소요되었으나 PReq 신호를 이용한 경우 $5000\mu\text{s}$ 가 소요되었다.

제안된 기법은 기존의 마스터 이중화 기법의 마스터 전환시간에 비해 한 사이클 타임(T_{EPL_cycle})에 해당하는 약 $1000\mu\text{s}$ 를 줄일 수 있고, 이로 인해 마스터 고장에 의한 데이터 손실 및 복구시간을 최소화할 수 있다.

본 연구를 통해 제안된 마스터 이중화 기법은 마스터 전환을 위해 일정 시간 이상의 비동기 구간을 필요로 하기 때문에 이를 효율적으로 활용하는 방법이 고려될 수 있다.

참 고 문 헌

- [1] C. F. Chuang and H. P. Chou, "Investigation of Data Communication Systems in Lungmen Nuclear Power Plant Project" *IEEE Transactions on Nuclear Science*, vol. 53, issue 3, pp. 1443-1449, June. 2006.
- [2] 김동훈, 박성우, "원전 통신망을 위한 결정론적 데이터 통신 구조", *전기학회논문지*, 제55D권 제5호, pp. 199-204, 2006.
- [3] Anton Soppelsa, Adriano Luchetta and Gabriele Manduchi, "Assessment of Precise Time Protocol in a Prototype System for the ITER Neutral Beam Test Facility", *IEEE Transactions on Nuclear Science*, vol. 57, issue 2, pp. 503-509, April. 2010.
- [4] EPSG Draft Standard 301, 302-A, 302-B Ethernet POWERLINK Specification, 2003.
- [5] Jurgen Jasperneite, Jahanzaib Imtiaz, Markus Schumacher, and Karl Weber, "A Proposal for a Generic Real-Time Ethernet System", *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, vol 5, issue 2, pp. 75-85, May. 2009.
- [6] Kai Hansen, "Redundancy Ethernet in Industrial Automation", *10th IEEE Conference on Emerging Technologies and Factory Automation*, vol. 2, pp. 941-947, September. 2005.
- [7] G. Cena, L. Seno, A. Valenzano, and S. Vitturi, "Performance analysis of Ethernet Powerlink networks for distributed control and automation systems", *ELSEVIER Computer Standard & Interfaces*, vol. 31, issue 3, pp. 566-572, March. 2009.
- [8] IEEE Standard for a Precision Clock Synchronization Protocol for Networked Measurement and Control Systems, July. 2008.
- [9] D. Miller, "DP83640 synchronous Ethernet mode: Achieving sub-nanosecond accuracy in PTP applications", National Semiconductors Inc., Santa Clara, CA, 2007.

— 저 자 소 개 —

김 동 성(정회원)
대한전자공학회 논문지
-CI 제47권 제6호 참조



김 윤 섭(정회원)
2008년 금오공과대학교
전자공학부 학사졸업.
2011년 8월 동대학원
제어임베디드공학과
석사졸업
2010년~현재 알에스오토메이션
연구원

<주관심분야 : 산업용임베디드시스템, MMS
(ISO 9506)>



윤 진 식(학생회원)
2011년 금오공과대학교
전자공학부 학사졸업.
2011년 3월~현재 동대학원
전자공학과 석사
<주관심분야 : 산업용통신망, 실
시간시스템>