원전 DCS용 제어통신망 설계

이 재 민*, 박 태 림*, 문 홍 주**, 권 욱 현*

*서울대학교 전기공학부
**한국전력공사 전력연구원,
전화 : (02) 873-2279 / 팩스 : (02) 878-8933

A Design of Control Network for DCS in Nuclear Power Plant

Jae Min Lee*, Tae Rim Park*, Hong-Ju Moon** and Wook Hyun Kwon*
*School of Electrical Engineering, Seoul National University
**Korea Electric Power Research Inst., Korea Electric Power Corporation
E-mail : ljmpaul@cisl.snu.ac.kr

Abstract

Distributed Control System(DCS) is one of the best solutions to implement control systems because it provides continuous observation of control process and execution of commands to induce proper operations. In this paper, a design of control network for DCS in nuclear power plant is proposed. The proposed control network on DCS has a simple architecture and deterministic property. Thus, the proposed control network offers hard real-time periodic service. It also has redundant media for the fault-tolerance. As a result, high safety and reliability required in nuclear power plant are guaranteed.

I. 서론

최근 발전소 제어 시스템, 공장 자동화 시스템으로 사용되는 분산 제어 시스템은 대형의 플랜트 형태로 구성됨에 따라 제어기의 수가 증가하고 각종 제어기의 제어주기가 짧아지고 있다. 따라서 고속 통신망의 도입은 필수적이다. 그리고 신뢰성과 안정성을 요구하는 경우 결함 허용 시스템을 사용함으로써 요구하는 성능을 만족시킨다. 특히 원전의 경우, 결함이 발생하여 원전 사고가 발생하면 인적, 물적으로 엄청난 피해를 초래하므로 고 신뢰성과 안정성이 요구된다. 그러므로 다중화된 시스템과 통신망을 사용하여 결함 허용성을 구현하고 고 신뢰성을 보장하는 것이 필요하다[1-5].

원전에서 사용되는 기존의 통신망으로는 hard-wiring을 이용한 방법, 서울대에서 개발한 PICNET,[2-4] EATON사의 PCS에서 사용하는 단순화된 링 형태의 PERFORM Net[6] 등이 있다. 하지만, hard-wiring을 이용한 방법은 단순하고 별도의 매체접근 방식이 없는 장점이 있으나 제어기의 수가 증가할수록 매체의 길이가 증가하고 배선이 복잡해지는 단점이 있다. 서울대에서 개발한 PICNET은 10Mbps의 전송속도를 가지고 있고 매체 이중화를 통해 결함 허용성을 구현함으로써 고 신뢰성을 보장해 주지만 속도가 느리고 매체 접근 방식이 IEEE 802.4로 복잡하고 다양한 서비스를 제공하여 오히려 그 동작이 복잡하다는 단점이 있다. PERFORM Net은 Systran사의 SCRAMNet을 이용한 통신망으로 150Mbps의 전송속도를 가진 고속의 통신망이고 H/W 방식으로 구현된 Replicated memory shared memory 방식을 사용한다. 하지만 물리적인 스위치를 이용한 결함 허용 방식을 이용하므로 결함이 감지된 후 대처하는데 걸리는 시간이 길고 그 작동에 있어 결함이 많이 발생하는 단점이 있다. 그러므로 유지 보수성이 뛰어나고 신뢰성과 빠른 전송주기의 하드 리얼타임을 제공하는 새로운 통신망의 개발이 필요하다.

본 논문에서는 기존의 통신망의 단점을 개선하고 성능을 향상시킨 새로운 원전 분산 제어 시스템을 위

한 제어통신망의 설계를 제안한다. 제안된 통신망은 물리계층으로 기존 통신망에서 많이 사용하고 있는 100Mbps의 패스트 이더넷을 사용하여 고속의 통신 속도를 제공하면서 동시에 뛰어난 유지 보수성을 제공한다[7]. 또한 링형의 토폴로지로 구현하여 배선이 간단하도록 하였으며, 토큰 방식을 이용하여 실시간성을 만족하도록 한다. 또한 고 신뢰성과 안전성을 위해 매체 이중화 및 보드 레벨 이중화를 지원하고 결함 감지 및 복구을 위한 방법을 제안한다.

본 논문에서는 제안한 원전 DCS용 제어통신망에 대한 설계를 2장에서 소개하고 3장에서 설계된 제어통신망에 대한 성능분석에 대해 설명한다. 4장에서는 실제 원전 제어통신망에 적용한 분석결과를 소개하고 마지막으로 5장에서 결론 및 추후 연구에 대해서 논한다.

II. 원전 DCS용 제어통신망

본 논문에서 제안된 제어통신망은 매체 이중화 및 보드레벨 이중화를 통해 결함 허용성을 구현하고 유지보수성의 향상을 위해 이미 검증된 물리 계층인 IEEE 802.3 100BASE-FX를 이용한다[7]. 전송매체로서 광케이블을 이용하여 원전에서 발생하는 전자기적 노이즈에 영향을 받지 않도록 한다. 각각의 노드들은 배선이 쉽고 별도의 허브와 같은 장비가 필요하지 않은 링형의 토폴로지로 연결한다. 이것은 원전 현장의 요건을 반영한 것으로 허브와 같은 별도의 장치가 부가될 경우 별도의 신뢰성 검증이 필요하고 유지보수성 측면에서도 어려움이 있다.

매체 접근 제어 방식으로는 토큰버스 방식을 사용한다. 각각의 노드들은 이전 노드로부터 토큰 프레임에 의해 토큰을 전달받아 데이터 프레임을 브로드캐스팅한다. 이때 데이터들은 pre-scheduling에 의해 버퍼에 저장된다. 또한 데이터들은 공유메모리의 어드레스를 통해 구분되도록 설계하여 전송 동작을 단순화 시켜 속도를 향상시킨다. 데이터 링크 계층은 단순히 PLD로 구성된 스위치와 물리 계층을 제어할 MPC8260,[8] 토큰 방식의 매체 접근 방식이 구현된 MAC S/W로 구성된다. 전송 프레임의 포맷은 IEEE 802.3 프레임과 동일하다[7].

응용계층과 응용 프로그램 접속부는 Replicated memory 방법을 이용한다. 이 방법은 제어 모듈과 제어 통신모듈이 동일한 메모리 구조를 가지고 있고 하나의 메모리가 업데이트되면 바로 그 노드에 있는 모든 모듈의 메모리가 동일하게 업데이트되는 방법이다.

제안한 제어통신망은 실시간성 보장을 위해 상태기반의 경성 실시간 주기 데이터 전송서비스(hard real-time periodic data transmission service)만 제공한다. 주기 데이터는 짧은 주기 데이터(Short periodic data)와 긴 주기 데이터(long periodic data)로 나뉘어진다. 비주기 데이터는 공유메모리에 일정 영역을 할당하여 일정주기 이내에는 반드시 전송되도록 함으로써 주기 데이터로 변형하여 전송한다. 아래 그림 1은 제어통신 모듈(Control Network Module, CNM)의 구성도이다.

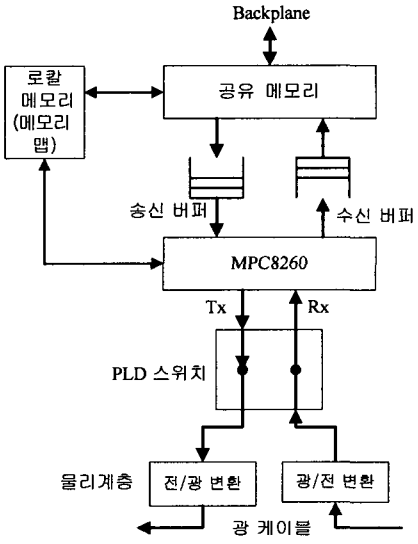

그림 1 제어 통신 모듈의 구성도
Fig. 1 The block diagram of Control Network Module

PLD 스위치는 송수신에 따라 그림 2와 같이 변형되어 수신 노드는 그림 2의 (a)와 같이 광/전 변환을 통해 수신한 프레임을 바로 전/광 변환을 통해 송신함으로써 브로드캐스팅이 이루어지도록 한다. 송신 노드는 그림 2의 (b)와 같이 절단되어 있으므로 송신한 프레임이 모든 노드에 수신된 후 송신 노드에서 더 이상 다른 노드로 전송되지 않는다.

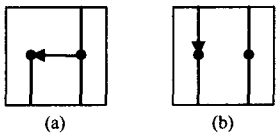

그림 2 PLD 스위치 (a)수신노드, (b)송신노드
Fig. 2 PLD Switch (a)Rx Node, (b)Tx Node

제안된 통신망은 네트워크 관리 계층을 두어 통신망 초기화, 오류 관리, 구성관리의 기능을 담당한다.

제안한 제어 통신 모듈은 이중화된 매체를 통해 동시에 송수신을 하고 수신된 데이터가 이중화된 공유메모리에 각각 저장되므로 하나의 매체에 결함이 발생하더라도 다른 매체를 통해 정상적으로 수신이 된다. 그러므로 제어 모듈에서는 수신된 데이터의 건전성을 판단하여 정상적으로 수신된 데이터를 사용한다.

Ⅲ. 제어통신망의 성능 분석

본 장에서는 2장에서 설계한 제어통신망에 대한 성능 분석을 한다. 성능지표로는 정상상태의 $TRT_{\max}$ (maximum token rotation time)이다 최악의 조건에서 $TRT_{\max}$가 짧은 주기 실시간 데이터의 전송 주기보다 짧으면 이 통신망의 실시간성은 만족한다고 할 수 있다. 여기서 전송주기는 I/O모듈간의 전송 주기가 아닌 공유메모리간 전송주기를 나타낸다. 그리고 $TRT_{\max}$를 계산하는데 필요한 변수는 다음과 같다.

1) T_s : 짧은 주기 실시간 데이터의 전송주기
2) T_l : 긴 주기 실시간 데이터의 전송주기
3) R : 매체 전송속도 (100 $Mbps$)
4) T_b : 1 bit_time ($1/R = 10\,ns/bit$)
5) D_s : 짧은 주기 실시간 데이터량($byte$)
6) D_l : 긴 주기 실시간 데이터량($byte$)
7) N_n : 노드 수
8) T_{ch} : 100BASE-FX의 매체 지연($5ns/m$)[9]
9) T_{if} : 데이터 프레임간 간격
10) T_{tp} : 토큰 프로세싱 시간
11) F_d : 데이터 프레임의 길이($byte$)
12) F_t : 토큰 프레임의 길이($byte$)
13) T_{tr} : 광 중계기 광신호가 수신된 후 광->전->광 변환 지연시간
14) L_{n-n} : 노드간 평균 거리
15) N_{df} : 데이터 프레임 개수
16) N_{nf} : 네트워크 관리 프레임 개수
17) T_{df} : 데이터 프레임 전송 지연 시간
18) T_{tf} : 토큰 프레임 전송 지연 시간
19) T_{n-n} : 노드간 전송 매체 지연

제어통신망은 T_s내에 짧은 주기 실시간 데이터와 일부분의 긴 주기 실시간 데이터를 전송한다. 만약 T_l이 T_s의 5배이면 T_s내에 전송될 총 데이터(D)는 $D=D_s+D_l/5$이다. 그러므로 N_f는

$$N_f = \frac{D}{F_d - 22 - 4} \tag{1}$$

이다. 여기서 22는 프레임 헤더의 길이이고 4는 CRC 길이이다. 그리고 T_{df} 는

$$T_{df} = F_d \times 8bit/byte \times T_b \tag{2}$$

이다. 마찬가지로 T_{tf}는

$$T_{tf} = F_t \times 8bit/byte \times T_b \tag{3}$$

이다. 데이터 프레임간 간격(T_{if})은 IEEE802.3 표준인 최소960ns 보다 길어야 한다. 이것은 MPC8260 내 통신 칩에서 실행되는 microcode의 실행 시간과 dualport RAM에서 FIFO로 데이터를 가져오는 overhead를 감안하고 데이터 프레임을 처리하기 위한 프로세싱 타임을 고려하여 결정해야 한다. 데이터 프레임의 처리는 송수신을 하면서 동시에 이루어지므로 통신 속도에 비해 빠른 MPC8260의 CPM에 의해 pipeline의 여분을 고려하지 않아도 된다. 그러나, 처음에 고속 통신 버퍼192 $byte$를 채워 넣는 작업과 버퍼 억세스 타임, 메모리 억세스 타임, DMA 관련 프로세싱 타임이 고려되어 프레임 간격이 결정되어야 한다 [8].

데이터 프레임은 브로드캐스팅에 의해 계속 전송되고 있으므로 매체에서의 전송지연은 고려하지 않지만 토큰 프레임의 경우 토큰 프레임을 수신한 노드가 토큰을 전달받은 후 전송을 시작하므로 노드간 전송매체 지연이 고려되어야 한다. 이 전송 지연은 매체에서의 지연과 광전변환, 전광변환, 스위치의 전송지연의 합이다. 그러므로 T_{n-n}는

$$T_{n-n} = T_{ch} \times L_{n-n} + T_{tr} \tag{4}$$

이다. 또한 토큰 프레임을 수신한 후 토큰이 전달 받았음을 확인하고 스위치의 상태를 송신노드로 전환하고 최초 송신을 시작하기 위한 준비 시간을 고려해야 한다. 이 시간을 토큰 프로세싱 시간(T_{tp})이다. 그러므로 $TRT_{\max}$는

$$\begin{aligned} TRT_{\max} = {} & (N_{df} + N_{nf}) \times (T_{df} + T_{if}) \\ & + N_n \times (T_{tf} + T_{tp} + T_{n-n}) \end{aligned} \tag{5}$$

이다. 여기서

$$TRT_{\max} < T_s \tag{6}$$

이면 주어진 전송주기를 만족시킬 수 있다.

Ⅳ. 성능 분석 예

본 장에서는 실제 제어통신망의 요구사항에 적용하여 TRT_{max}를 구하여 전송주기를 만족 여부를 판단하였다. 다음은 한 원전의 제어통신망 요구사항이다.

1) 통신 속도(R)는 100Mbps의 패스트 이더넷으로 한다.
2) 제어통신망의 데이터는 다음과 같다.
- 아날로그 신호 : 약 20,000포인트, 20ms주기, 4Byte/포인트(Time Tagging, Source, Quality 포함)
- 디지털 신호 : 약 20,000포인트, 20ms주기, 2Byte/포인트(Time Tagging, Source, Quality 포함)
- 기타 관련 데이터 : 360Kbytes 100msec 주기

3) 노드수(N_n) : 64 노드
4) 노드간 거리 : 평균 1000m
5) 제어통신망의 매체는 결함 허용성을 가진다.
6) 각 노드는 각각 8Kbytes의 공유메모리를 가지고 있고 일정주기 내에 모든 노드의 데이터가 업데이트된다. 즉 경성 실시간 데이터이다.
7) 통신 방식으로 브로드캐스팅을 사용한다.
8) 네트워크 관리를 위한 8 프레임이 추가로 전송될 수 있다.

위 요구사항에 대해 TRT_{max}를 계산하면 다음과 같다. 여기서 T_{if}는 $6000ns$, T_{tp}는 $8000ns$로 가정한다. 그리고 편의상 데이터 프레임의 데이터를 $1Kbyte$, 토큰 프레임의 데이터를 $64byte$로 가정한다.

$$N_f = \frac{20000 \times (4byte + 2byte) + 360Kbyte/5}{(1050 - 22 - 4)byte} = 192 \quad (7)$$

$$T_{df} = 1050 \times 8bit/byte \times 10ns/bit = 84000ns \quad (8)$$

$$T_{tf} = 72 \times 8bit/byte \times 10ns/bit = 5760ns \quad (9)$$

$$T_{n-n} = 5ns/m \times 1000m + 200ns = 5200ns \quad (10)$$

$$TRT_{max} = (192 + 8) \times (84000ns + 6000ns) + 64 \times (5760ns + 8000ns + 5200ns) \quad (11)$$

$$= 19213440ns = 19.2ms$$

계산 결과 $19.2ms < 20ms$ 이므로 요구되는 전송 주기를 만족한다. 그리고 T_t은

$$T_t = 19.2ms \times 5 = 96ms \quad (12)$$

으로 요구사항을 만족한다.

Ⅴ. 결론

본 논문에서는 원전 DCS을 위한 제어통신망의 설계방안을 제안하였다. 또한 성능분석을 통해 실시간성을 보장하는 것을 보였다. 이 방법은 물리계층으로 패스트 이더넷을 이용하여 유지보수성을 높였고 매체 접근 제어 방식으로 토큰 패스 방식을 이용하고 경성 실시간 서비스를 제공한다. 그리고 매체 이중화 및 보드레벨 이중화를 통해 결함 허용성을 가지며 고 신뢰성 및 안전성을 보장한다.

현재 본 논문에서 제안된 제어 통신망의 구현과 현장 적용을 위한 연구가 진행중이며 앞으로 실제 적용에 의한 성능 분석에 대한 연구가 필요하다.

참고문헌

[1] 문홍주, 신창훈, 이병윤, 이성우, 윤명현, 이재민, 김광현, 권욱현, "네트워크 관리 소프트웨어와 매체 접속 계층의 결함 감지 및 이중 채널 관리기를 이용한 제어 통신망의 매체 이중화 관리 방법",*Proceedings of the 14th KACC*, pp. D-98 ~ D-101, 1999

[2] Jae Min Lee, Dong Sung Kim, Wook Hyun Kwon, Hong-Ju Moon, Myung-Hyun Yoon, "Physical Layer Redundancy Method for Fault-Tolerant Networks and Its Application to an Autonomous Mobile Robot, " *Proceedings of the 1999 International conference on Mechatronic Technology*, pp. 474-479, 1999

[3] 한국형 원전 DCS(KNX-5) 개발", 한국전력공사 전력 연구원, 1996

[4] 박제형, 김영신, 권욱현, "원자력발전소 분산제어시스템용 고신뢰 통신망의 응용계층과 응용 프로그램 접속부의 설계", 제어,자동화,로보틱스 합동학술회의 논문집, pp. 470-475, 2000

[5] KINS/GR-177, "차세대 원자로 안전규제기술 개발 (차세대원자로 계통 상세안전요건 개발)", 한국원자력안전기술원, 1999

[6] "Shared-Memory Computing Architectures for Real-Time Simulation-Simplicity and Elegance", SYSTRAN corporation, Technical paper, 1999

[7] IEEE Std 802.3, 1998 Edition

[8] "MPC8260 PowerQUICCII User's Manual", Motorola, 1999

[9] "구현: 패스트 이더넷 구성 지침", www.intel.com