

원자력 발전소 제어 계통을 위한 통신망의 해석과 사례 연구

이성우, 윤명현, 문홍주, 신창훈, 이병운
한국전력공사 전력연구원

Analysis of a Communication Network for Control Systems in Nuclear Power Plants and a Case Study

S.W. Lee, M.H. Yoon, H.J. Moon, C.H. Shin, B.Y. Lee
Korea Electric Power Research Institute

Abstract - In this paper, a real-time communication method using a PICNET-NP(Plant Instrumentation and Control Network for Nuclear Power plant) is proposed with an analysis of the control network requirements of DCS (Distributed Control System) in nuclear power plants. The method satisfies deadline in case of worst data traffics by considering aperiodic and periodic real-time data and others. In addition, the method was used to analyze the data characteristics of the DCS in existing nuclear power plant. The result shows that use of this method meets the response time requirement(100ms).

1. 서 론

분산 제어 시스템의 통신망은 적용범위에 따라서 계층 구조를 가지는 경우가 많은데, 이런 경우 보통 IEEE 802.4 토큰 버스 규약[1], IEEE 802.5 토큰 링 규약 [2], 그리고 FDDI 규약[3] 등의 통신 규약들은 중위권을 담당하고, 프랑스에서 제안된 FIP[4], 독일에서 제안된 Profibus[5], 그리고 자동차의 통신 규약으로 제안되어 국제 표준으로 자리잡은 CAN[6]등 많은 필드 버스들은 하위 계층의 센서, 구동기 부분의 통신을 담당한다. 하지만, 각 네트워크 프로토콜들의 특성으로 볼 때 중위 계층 하위 계층의 구분이 모호하다.

이러한 프로토콜들을 원자력 발전소 분산 제어 시스템의 중위 계층 통신망에 바로 적용하기에는 어려움이 많다. 원자력 발전소와 같은 안전 관련 시스템의 경우에는 비주기 실시간 데이터의 데드라인을 보장할 수 있는 네트워크 프로토콜을 사용하거나, 혹은 경성 실시간 주기를 보장할 수 있는 방법을 제공하는 네트워크를 사용하여야 한다. 동시에 주기 실시간 데이터의 전송도 보장할 수 있는 방법을 제공할 수 있어야 한다.

본 논문에서는 전력연구원에서 제안한 원자력 발전소 분산 제어시스템 프로토타입인 KNX-5[7]의 제어 네트워크를 대상으로 하여 비주기 실시간 데이터와 주기 실시간 데이터의 경성 실시간, 연성 실시간(soft real-time) 데드라인을 보장할 수 있는 방법을 제안한다. 2장에서는 중위 계층으로 사용되는 KNX-5의 프로토타입의 구조에 대해서 분석하였다. 3장에서는 경성 실시간 통신을 지원할 수 있는 방법을 제안하였다. 4장에서는 제안한 방법에 대한 실시간 특성을 해석하고, 현재 가동 중인 원자력 발전소 제어계통을 설정하고 데이터 수와 데이터 특성을 분석하여 제안한 방법을 가지고 원자력발전소 제어계통에 PICNET-NP를 적용하였다[8]. 마지막으로 5장에 결론이 있다.

2. 원자력발전소 분산 제어 시스템의 구조

본 논문이 대상으로 하고 있는 네트워크는 그림 1에서 나타나 있는 2계층과 3계층을 연결하는 제어 네트워크이다. KNX-5에 적용할 제어 네트워크로 제안된 것이

PICNET-NP(Plant Instrumentation and Control Network for Nuclear Power plant)이다. 네트워크 요구사항을 기준으로 제안되었다. PICNET-NP는 제어 네트워크의 특성상 사건에 의해 발생하는 긴급 데이터를

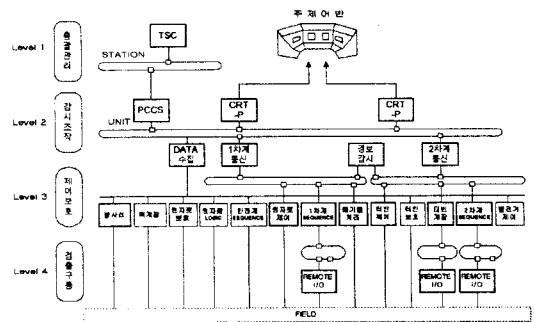


그림 1. KNX-5의 프로토타입

처리하기에 좋은 성능을 지니고 있으며, 동시에 주기적으로 발생하는 주기 데이터도 처리할 수 있도록 설계되었다. PICNET-NP는 IEEE 802.3 물리 계층에 IEEE 802.4 MAC 와 IEEE 802.2 데이터링크 계층 (MAC, LLC)을 접속하고 그 위에 응용 계층을 얹은 구조를 갖는다[9].

3. PICNET-NP를 사용한 실시간 통신

3.1 PICNET-NP의 기본 사양

전송 매체로는 동축(coaxial) 케이블과 꼬임 쌍선(twisted-pair) 케이블을 사용한다. 그리고 트랜시버 등의 장비를 이용하여 광섬유(fiber optic) 케이블도 이용할 수 있도록 한다. 최대전송거리의 별도의 확장 기기가 없이 꼬임 쌍선 케이블의 경우 100m, 동축케이블의 경우 500m이며 repeater 등의 별도의 확장 기기를 사용하는 경우 3km이다. 전송률은 5 Mbits/s이다. 최대 250개의 스테이션을 연결할 수 있으며, 최대 15개의 그룹으로 분할할 수 있고 한 그룹은 최대 64개의 스테이션으로 이루어질 수 있다.

3.2 데이터의 정의 및 길이 규정

여기서는 PICNET-NP에서 사용하는 프레임의 구조를 기술한다. 기술된 프레임은 분산 제어 시스템에서 요구되는 데이터를 고려하여 결정하였으며 4장에서 원자력발전소 제어 계통에 적용할 때 사용된다.

3.2.1 토큰 프레임 구조

IEEE 802.4 토큰버스 규격에 정의되어 있는 프레임을 사용한다. 21 옥텟으로 이루어지며, 토큰 프레임의 전송 시간은 33.6 μ sec이다.

Preamble	SD	FC	DA	SA	FCS	ED
10	1	1	2	2	4	1

3.2.2 데이터 프레임

(21+L) 옥텟으로 이루어지며, 전송시간은 (21+L) × 8 × 0.2 μsec이다. 여기서 데이터 부분인 L은 데이터의 특성에 따라 다른 구조를 가진다.

Preamble	SD	FC	DA	SA	Data	FCS	ED
10	1	1	2	2	L	4	1

긴급 데이터

비주기적으로 발생하는 사건(Event)에 의한 데이터는 시간 기록(Time Stamp), 사건 식별자(e. ID), 사건 데이터(e. Data), 상태(Status) 등을 포함하도록 하였다. 이렇게 해서 10바이트로 이루어지며 구조는 다음과 같다. 따라서 긴급 데이터 전송을 위한 프레임의 길이는 31바이트가 되며 31 옥텟 타임의 시간이 소모된다.

Dsap	Ssap	Ctrl	ID	Time Stamp	e. ID	e. Data	Status
1	1	1	2	2	1	1	1

확인 데이터(ACK)

IEEE 802.4 토크버스 규격에 정의되어 있는 프레임을 사용한다. 3바이트로 이루어지며 구조는 다음과 같다. 따라서 긴급 데이터에 대한 ACK 전송을 위한 프레임의 길이는 24바이트가 되며 24 옥텟 타임의 시간이 소모된다.

Dsap	Ssap	Ctrl
1	1	1

주기 데이터

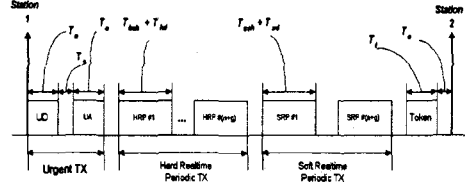
경성 실시간 주기 데이터와 연성 실시간 주기 데이터 모두 같은 구조를 가진다. 주기 데이터는 여러개가 한번에 전송될 수 있는 구조로 되어있다. 주기 데이터는 데이터 식별자(ID), 데이터(Data), 그리고 상태(Status) 정보로 이루어진다. 주기 데이터는 여러 개가 한번에 전송될 수 있는 구조로 되어있다. 주기 데이터 한 개의 길이는 5바이트로 이루어지며 k개의 주기 데이터가 합쳐진 형태의 구조는 다음과 같다. 따라서 k개의 주기 데이터를 포함한 주기 데이터의 전송을 위한 프레임의 길이는 (21+4+5k)바이트이며 (21+4+5k) 옥텟 타임의 시간이 소모된다.

Dsap	Ssap	Ctrl	#ofData	ID	Data	Status	...	k 번째 주기데이터
1	1	1	1	2	2	1	...	5

고급 데이터

긴급 데이터나 경성 실시간, 연성 실시간 주기 데이터와는 달리 일정한 길이를 가지지 않는다. 하지만 한번에 보낼 수 있는 최대 프레임 크기는 1K 바이트로 제한된다.

Dsap	Ssap	Ctrl	고급 데이터
1	1	1	



- n : 스테이션의 총개수
- a : 비주기 실시간 데이터의 총개수
- b : 경성 실시간 주기 데이터의 총개수
- c : 연성 실시간 주기 데이터의 총개수
- g : 통신망에 정의된 그룹의 총개수
- T_u : 비주기 실시간 데이터 전송시간
- T_h : 비주기 실시간 데이터에 대한 확인 응답 전송시간
- T_{sh} : 경성 실시간 주기 데이터 오버헤드 전송시간
- T_{soh} : 연성 실시간 주기 데이터 오버헤드 전송시간
- T_{sd} : 경성 실시간 주기 데이터 전송시간
- T_{sd} : 연성 실시간 주기 데이터 전송시간
- T_t : 토큰 전송시간
- T_p : 전송 프레임들 사이의 공백시간
- T_o : 토큰 전달에 필요한 사이시간

그림2. 데이터 전송에 세 가지 방식을 사용

3.3 데이터 전송 시간적 성능 계산 방법

최악의 경우를 고려하기 위해 다음과 같이 가정을 하였다. 긴급 데이터는 LLC의 L_DATA_ACK 프리미티브를 사용한다. 모든 주기 데이터(경성 실시간 데이터, 연성 실시간 데이터)의 주기는 똑같다. 따라서 토큰 회전 시간은 주어진 주기보다 작도록 보장되어야 한다. 그리고 주기 데이터의 경우, 유니 캐스팅, 멀티 캐스팅, 브로드 캐스팅 3가지 전송방법을 사용한다. 이 때, 한 스테이션이 최대로 주기 전송을 하는 경우에는 (n-1)의 유니 캐스팅, g번의 멀티캐스팅, 1번의 브로드 캐스팅을 하게 된다. 따라서 최대 주기 전송의 횟수는 (n+g)가 된다.

① $n \cdot (n+g) \leq b$ 와 $n \cdot (n+g) \leq c$ 가 성립하면 TRT는 다음과 같다.

$$TRT = a \cdot (T_u + T_p + T_a + T_p) + n \cdot (n+g) \cdot (T_p + T_{sh}) + b \cdot T_{hd} + n \cdot (n+g) \cdot (T_p + T_{soh}) + c \cdot T_{sd} + n \cdot \{T_t + T_o\}$$

② $n \cdot (n+g) \leq b$ 와 $n \cdot (n+g) > c$ 가 성립하면 TRT는 다음과 같다.

$$TRT = a \cdot (T_u + T_p + T_a + T_p) + n \cdot (n+g) \cdot (T_p + T_{sh}) + b \cdot T_{hd} + c \cdot (T_p + T_{soh} + T_{sd}) + n \cdot \{T_t + T_o\}$$

③ $n \cdot (n+g) > b$ 와 $n \cdot (n+g) \leq c$ 가 성립하면 TRT는 다음과 같다.

$$TRT = a \cdot (T_u + T_p + T_a + T_p) + b \cdot (T_p + T_{sh} + T_{hd}) + n \cdot (n+g) \cdot (T_p + T_{soh}) + c \cdot T_{sd} + n \cdot \{T_t + T_o\}$$

④ $n \cdot (n+g) > b$ 와 $n \cdot (n+g) > c$ 가 성립하면 TRT는 다음과 같다.

$$TRT = a \cdot (T_u + T_p + T_a + T_p) + b \cdot (T_p + T_{sh} + T_{hd}) + c \cdot (T_p + T_{soh} + T_{sd}) + n \cdot \{T_t + T_o\}$$

$T_p = 10 \mu s$, $T_t = 33.6 \mu s$, $T_o = 40 \mu s$ 에 앞의 데이터 구조를 적용시키면, $T_{oh} = 25$ (octet time) = $40 \mu s$, $T_{soh} = 25$ (octet time) = $40 \mu s$, $T_u = 31$ (octet time) = $49.6 \mu s$, $T_a = 24$ (octet time) = $38.4 \mu s$ 이다. 이 값들을 경우 1, 2, 3, 4에 적용시키면 TRT를 구할 수 있다.

4. 사례연구

4.1 토큰 회전 시간 (TRT : Token Rotation Time)

토큰을 다음 스테이션으로 넘긴 후 다시 토큰을 받을 때까지의 시간을 말한다. 토큰 회전 시간이 일정하면 주기 데이터의 전송이 쉽게 구현될 수 있다. 하지만 일반적으로 토큰 버스 네트워크에서는 토큰 회전 시간이 일정하지 않다. 따라서 주기적인 데이터의 전송에 어려움이 있다. 본 논문에서는 토큰 회전 시간을 일정 제한 내에 유지하는 방법을 제안한다.

전송되는 데이터가 전혀 없다면 네트워크에는 토큰만 회전하게 된다. 이 경우 전송 시간은 $33.6 \mu sec$ 이다. 그리고 실제 전송 시간외에 토큰 전달 시 부가적으로 소요되는 시간이 있는데 이 시간은 스테이션의 수나 스테이션간의 거리등에 따라 달라지나 약 $40 \mu sec$ 정도면 보통 충분하다. 따라서 스테이션이 n 개일 때 TRT는 $n(33.6+40)$ 이 된다. 스테이션이 32개일 때 2.46 msec, 10개일 때 0.74 msec가 된다. 사용자가 설정할 수 있는 전송에 관련된 MAC 변수는 THT와 TRT4, TRT2, TRT0 이다. 즉 개별적인 스테이션의 통신량에 따라서 변수들을 설정하게 된다. 이 변수들은 IEEE 802.4의 실시간 통신 특성을 결정짓기 때문에 이 변수들의 값을 어떻게 설정하는가가 PICNET-NP의 통신 성능을 결정한다.

THT 결정

THT_i는 i 번째 스테이션에서의 THT이다. 각 스테이션의 THT는 긴급 데이터와 하드 실시간 주기 데이터에 의해 결정된다. THT_i는 다음과 같이 계산되어진다. 이 경우 가능한 최대 긴급 데이터와 주기 데이터 프레임의 개수를 잡았으므로 전송 도중 발생할 수 있는 오버헤드는 무시할 수 있다.

$$THT_i = a_i (T_u + T_p + T_o + T_a) + (n+g)(T_p + T_{oh}) + b_i T_{hd}$$

4.2 원자력 발전소 제어계통의 데이터 분석

원자력 발전소 제어계통의 기능과 아날로그 접점, 디지털 접점 수 등을 기초로 디지털 통신에 사용될 데이터를 분석하였다[10]. 결과를 데이터의 종류별로 표 1에 정리하였다.

표 1. 원자력 발전소 제어 계통의 데이터 수.

데이터수 시스템	긴급 데이터	하드실시간 주기데이터	소프트실시 간 주기데이터
RRS	22	13	5
RPCS	20	15	0
PPCS	19	3	11
PLCS	17	5	5
FWCS	36	24	88
SBCS	48	16	83
CEDMCS	87	120	118
합계	249	196	310

표 1에 표기된 데이터 수는 원자로 제어 계통에서 발생할 수 있는 모든 데이터를 분석한 것이다. 따라서, 토큰 1회전마다 발생하는 최악의 경우의 데이터 개수이다. 또한, 토큰 1회전 할 때 최악의 경우의 데이터가 2번 이상 발생하여서는 안 된다. 시스템에 따라 프레임의 길이는 같으나 통신 서비스 즉, 긴급, 주기, 고급 데이터에 따라 프레임의 크기는 달라진다. 데이터 값은 상황에 따라 달라지지만 데이터의 형태는 일정하다.

4.3 원자력발전소 제어계통에 PICNET-NP를 적용

기존의 원자력발전소 제어계통은 디지털 통신망을 사용하지 않고 점대점(Point-to-point)으로 직접 연결하여 사용하였다. 이로 인해 시스템이 지나치게 거대해지고 설치비용도 많이 들었으며, 유지 보수가 어려워졌다. 이 제어계통에 PICNET-NP를 적용한다면 그림 3과 같은 형태가 될 수 있다.

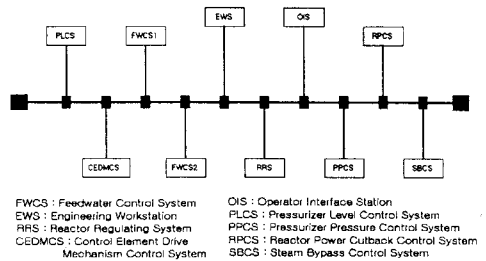


그림 3. 제어계통의 네트워크

그림 3를 보면 추가적으로 공정제어 및 감시제어 관련 설계 자료 및 프로그램을 작성할 수 있는 엔지니어 워크스테이션(EWS : Engineer Workstation)과 운전자가 전체 시스템에 대한 제어, 감시 기능을 할 수 있는 운전원 스테이션(OIS: Operator Interface Station) 등의 시스템이 네트워크에 연결되어 있다. 나머지 시스템들은 각각이 공정제어 유닛(PCU: Process Control Unit)에 해당된다고 보면 된다. 표 1에서 얻은 데이터 자료를 사용하여 PICNET-NP가 원자력발전소 제어계통의 디지털 통신망으로 적합한지를 분석하였다.

실제 원자력 발전소에서 요구하는 응답시간은 구동 기기에 따라서 약간의 차이는 있으나 계통간의 응답시간(PCU 와 PCU)은 100ms - 250ms 이고, PCU 와 OIS 사이의 응답 시간은 250ms-500ms로 차세대 한국형 원자로 기술 보고서에 제시되어 있다[11].

데이터를 가지고 최악의 상태를 고려하기 위해 다음과 같이 가정을 하였다. 긴급 데이터는 LLC의 L_DATA_ACK 프리미티브를 사용한다. 모든 주기 데이터(경성 실시간 데이터, 연성 실시간 데이터)의 주기는 똑같다. 따라서 토큰 회전 시간은 주어진 주기보다 작도록 보장되어야 한다. 그리고 주기 데이터의 경우, 유니캐스팅, 멀티캐스팅, 브로드캐스팅 3가지 전송방법을 사용한다. 이 때, 한 스테이션이 최대로 주기 전송을 하는 경우에는 (n-1)의 유니캐스팅, g번의 멀티캐스팅, 1번의 브로드캐스팅을 하게 된다. 따라서 최대 주기 전송의 횟수는 (n+g)가 된다. 그리고 $T_p = 10 \mu s$, $T_t = 33.6 \mu s$, $T_o = 40 \mu s$ 에 앞의 데이터 구조를 적용시키면, $T_{oh} = 25$ (octet time) = $40 \mu s$, $T_{soh} = 25$ (octet time) = $40 \mu s$, $T_u = 33$ (octet time) = $52.8 \mu s$, $T_a = 24$ (octet time) = $38.4 \mu s$ 이다. 이 값들을 식 (2)에 대입하면 최악의 경우의 TRT를 구할 수 있으며 이 값이 TTRT4가 된다. 데이터 전송 시간적 성능 계산 방법을 사용하여 타겟 토큰

로테이션 타임(TTRT4)을 계산하여 보면 다음과 같다.
 스테이션의 수가 10개, 그룹의 수가 6개, 긴급 데이터 수가 249개, 하드 실시간 주기 데이터 수가 196, 소프트 실시간 주기 데이터 수가 310개이면 경우 4에 해당되므로,

$$TTRT4 = 249(0.0528 + 0.01 + 0.0384 + 0.01) + 196(0.01 + 0.04 + 0.008) + 310(0.01 + 0.04 + 0.008) + 10(0.0336 + 0.04) = 57.773ms$$

따라서 그림 3의 네트워크 시스템이 표 1의 데이터를 사용하여 데이터를 주고받는 경우에 최대 57.773msec 안에는 전송을 보장할 수 있다는 결과를 얻을 수 있다. 최소 100msec인 원자력 발전소의 응답시간 요구사항을 충분히 만족하고 있음을 보인 것이다. 또한 PICNET-NP는 계산된 TTRT4의 최소 주기를 보장할 수 있음을 앞에서 보였다.

따라서 구한 TTRT4 이상의 연성 실시간 주기 데이터의 주기적인 전송도 보장한다.

5. 결론

본 논문에서는 원자력 발전소 분산 제어 시스템의 제어 네트워크의 요구사항을 분석하고, 제안된 PICNET-NP를 사용한 실시간 통신방법을 제안하였다. 제안된 방법을 사용함으로써 최악의 데이터 트래픽 상황에서도 비 주기 실시간 데이터, 주기 실시간 데이터에 대한 경성 실시간, 연성 실시간 테드라인을 만족할 수 있다는 것을 보였다. 제안된 방법을 시뮬레이션하기 위하여 현재 가동중인 원자력 발전소 제어계통을 설정하였다. 설정된 발전소 제어 계통의 데이터 수와 데이터 특성을 분석하여 최악의 경우에 타켓 토큰 로테이션 타임(TTRT4)을 구한 결과 원자력 발전소에서 요구하는 응답시간 100ms를 만족함을 보였다.

[참 고 문 헌]

- [1] *Token Passing Bus Access Method Physical Layer Specification*, ANSI/IEEE Standard 802.4, 1985.
- [2] *Token Ring Access Method and Physical Layer Specification*, IEEE Standard 802.5, 1983.
- [3] *FDDI Token Ring Media Access Control*, ANSI Standard X3.139, 1987.
- [4] *General Purpose Field Communication System*, prEN 50170, WorldFIP, 1995.
- [5] *DIN 19 245 Profibus Standard*, Profibus Trade Organization, 1993.
- [6] *Road vehicles Interchange of digital information - Controller area network (CAN) for high-speed communication*, ISO 11898, 1993.
- [7] "한국형 원전 DCS (KNX-5) 개발", 전력연구원, 1996.1.
- [8] "표준 경수로 계통 설비(하)", 한국전력공사 영광 원전 훈련 센터, 1996. 4.
- [9] 이성우, 임한석 "원자력 발전소 분산제어 시스템을 위한 중위 계층 통신망의 성능 분석", 대한전기학회 하계 학술대회, pp. 2537-2539, 1998. 7.
- [10] 이성우, 문홍주, "원자력 발전소 제어계통 Data Point 조사", 전력연구원 자체 보고서, 1998.
- [11] 차세대 한국형 원자로 기술보고서, N-740-EJD 460-001 I&C Overall Analysis & Design Report, pp. 1-96, 1998.