

원자력 발전소 디지털 제어 시스템을 위한 네트워크의 실시간 특성 해석

Real-Time Characteristic Analysis of a DCS Communication Network for Nuclear Power Plants

이 성 우*, 김 석 곤, 송성일
(Sung Woo Lee and Seok Gon Kim, Seong Il Song)

* 한국전력공사 전력연구원 (전화:(042)865-5641, 팩스:(042)865-5304, E-mail : swlee@kepri.re.kr)

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.

Keywords : DCS, TRT, TTRT, IEEE 802.4, aperiodic and periodic real-time data

I. 서론

분산 제어 시스템에 있어 네트워크는 매우 중요한 부분이다. 여러 가지 형태의 네트워크 프로토콜이 제시되어 사용되고 있다. 분산 제어 시스템의 통신망은 적용 범위에 따라서 계층구조를 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 필드버스들은 하위 계층의 센서, 구동기 부분의 통신을 담당한다. 하지만 각 네트워크 프로토콜들의 특성으로 볼 때 중위 계층 하위 계층의 구분이 모호하다. 특히 필드 버스의 경우에는 중위 계층에 사용되는 경우가 종종 있어 하위 계층이라고 규정지을 수는 없다.

중위권 통신망과 관련된 네트워크에 대한 연구는 많이 이루어졌다. 동기(Synchronous) 데이터 프레임의 전송한도 시간을 보장하는데 필요한 최악의 경우의 토큰 회전 시간에 대한 연구가 있다. FDDI 통신망에서의 최악의 경우의 토큰 회전 시간의 바운드에 대한 성질들이 증명되었다 [7, 8]. 실시간 데이터 프레임의 전송한도 시간을 보장하기 위해 타겟토큰 회전 시간, 토큰 보유시간, 버퍼의 수 등의 통신망 매개 변수를 정하는 방법이 제시되었다[9]. 토큰 보유시간을 할당하는 몇 가지 방법이 [10]에서 제시되었다. 이렇게 최악의 경우의 토큰 회전 시간에 대한 연구는 주로 동기 데이터 프레임을 대상으로 이루어졌다.

하지만 이러한 결과들을 안전 관련 시스템인 원자력 발전소 분산 제어 시스템에 바로 적용하기에는 어려움이 많다. 원자력 발전소의 경우에는 비 주기 실시간

데이터의 데드라인을 보장할 수 있는 네트워크 프로토콜을 사용하거나, 혹은 경성 실시간 주기를 보장할 수 있는 방법을 제공하는 네트워크를 사용하여야 한다. 동시에 연성 실시간 주기 데이터의 전송도 보장할 수 있는 방법을 제공할 수 있어야 한다. 하지만 기존의 결과들만으로는 이러한 요구사항을 보장할 수가 없다. 본 논문에서는 전력연구원에서 제안한 원자력 발전소 분산 제어시스템 프로토타입인 KNX-5[11]의 제어 네트워크를 대상으로 하여 비 주기 실시간 데이터와 경성 실시간 주기 데이터의 주기를 보장할 수 있는 방법을 제안한다.

2장에서는 원자력 발전소용 통신망 설계시 제어 통신망 요구사항들을 분석하고, 3장에서는 원자력발전소 분산 시스템의 구조에 대해서 설명하였다. 4장에서는 문제를 설정하고, 5장에서는 경성 실시간 주기 통신을 지원할 수 있는 방법을 제안하였다. 마지막으로 6장에 결론이 있다.

II. 원자력 발전소용 통신망 설계시 요구 사항

이 절에서는 원자력 발전소용 통신망을 설계할 때 고려해야 할 요구 사항들을 기술한다.

- 통신망 이상태기반(stated-based)인가 사건기반(event-based)인가를 파악하고 알맞은 형태의 통신망 규약을 선택한다.
- 안전한 고신뢰 시스템이어야 한다.
- 적용하려는 시스템이 정해져 있어야 한다.
- 통신 시스템은 결정적(Deterministic)이어야 한다.
- 그 시스템을 구성하는 노드들간의 데이터 송수신과 관련된 사항이 알려져 있어야 한다.
- 통신망은 안전성을 위해 이중화 및 분산형으로 되어 있어야 한다.

- 원자력 발전소에서 많이 사용하는 PID(Proportional Integral Differential) 알고리즘을 이용하는 실시간 제어를 위하여 수십 msec내의 반응 지연이 요구된다. 따라서 OSI의 7계층 중에서 3계층 정도만 사용하여야 한다.

- 통신망에서 최악의 트래픽인 경우에도 최대 응답시간이 보장되어야 한다. 이 최대 응답시간은 원자력 발전소 안전계통에 영향을 미치지 않는 최대시간 보다 충분히 작은 시간이어야 한다.

- 통신망의 규약, 통신망에 사용되는 실제 매체와 관련된 요구사항을 파악하고 이에 맞게 설계하여야 한다.

본 논문에서는 위와 같은 설계시 요구사항을 바탕으로 원전에 사용할 DCS를 대상으로 하는 통신망을 설계한다.

III. 원자력발전소 분산 제어 시스템의 구조

대형시스템에 설치되는 경우 제어기기들간의 구역설정을 통해 독립성을 확보하기 위하여 다음과 같은 특성을 부가한다.

1) 감시를 담당하는 운전원 스테이션(Operator Interface Station, OIS) 및 제어프로그램을 작성하는 엔지니어 스테이션(Engineer Interface Station, EIS)을 연결하는 정보통신망과 DGW-CI (Data gateway between control network and information network)를 통해 전달된 제어통신망의 정보를 저장하는 데이터베이스서버(DB SVR)로서 OIS에 연결되어 있다.

2) 제어통신망 구역간 통신을 위하여 PCU(Process Control Unit)와 필드통신망을 담당하는 FCU (Field Control Unit)가 설치되어 있다.

3) 전체 제어통신망 구역에 연결된 노드수의 합 및 전체 통신 데이터의 합은 기본구조에서의 제어통신망 노드수 및 통신데이터량의 최대값과 같다.

이와같은 형태를 그림으로 나타내면 그림 1과 같다.

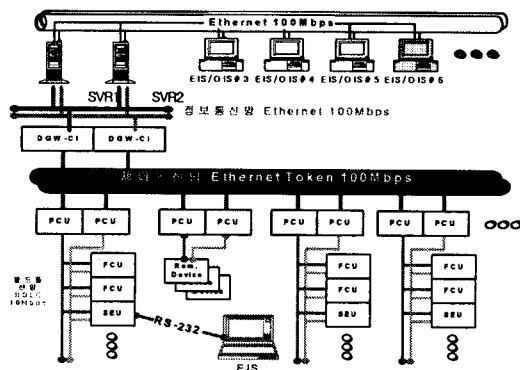


그림 1. 원자력발전소 디지털제어시스템 구조

Fig. 1. DCS architecture of Nuclear Power Plants.

그림에서 제어 통신망 및 정보통신망은 bus 형태로 그려져 있으나, 앞에서의 설계와 같이 star 형으로 구

축된다.

IV. PICNET-NP의 문제 설정

IEEE 802.4 토큰 버스 네트워크에서는 네트워크의 전송권한이 토큰에 의해 제어된다. 토큰을 소유한 노드만이 통신 매체를 사용할 수 있는 권한이 있다. 네트워크상의 각 노드들은 물리적으로 버스를 통해 연결되어 있으며, 논리적으로는 링을 형성하여 토큰을 다음 노드에 전달한다. 토큰의 전달 과정이 논리적인 링을 통해 이루어지기 때문에 물리적인 순서는 논리적인 토큰 전달 순서와는 무관하다. 그리고 토큰 버스 프로토콜은 4개의 우선 순위 0, 2, 4, 6(가장 높은 우선 순위 6)을 제공한다. 토큰을 받으면 우선 순위 6부터 차례로 전송을 하게 된다. 이 때 시간 제어는 타이머에 의해 이루어진다. IEEE 802.4에서는 이를 위해 토큰보유시간 (THT, Token Hold Time), 목적토큰회전시간 (TTRT, Target Token Rotation Time), 토큰회전시간 (TRT, Token Rotation Time)에 대한 타이머를 제공한다. THT는 다른 우선 순위와는 관계가 없으며, 우선 순위 6에 대한 시간 제어를 하는데 사용한다. 네트워크 상의 노드가 토큰을 받으면 항상 THT 만큼의 시간 동안 우선 순위 6에 해당하는 데이터를 네트워크로 전송할 수 있는 권리를 가지게 된다.

TRT는 TTRT와 함께 우선 순위 0, 2, 4에 해당하는 데이터의 전송 시간을 제어하는데 사용된다. TRT는 논리적인 링 상에서의 다음 노드로 토큰을 넘겨준 다음부터 시작하여 흘러간다. 토큰을 다시 받으면 이 때의 TRT 값이 토큰회전시간을 나타내게 된다. TTRT는 우선 순위 0, 2, 4에 대해 각각 존재하며 (TTRT₀, TTRT₂, TTRT₄) 이름에서 알 수 있듯이 예상되는 토큰회전시간을 나타낸다. 우선 순위 4에 해당하는 데이터의 전송은 토큰을 받은 다음 우선 순위 6에 해당하는 데이터를 전송하고 (우선 순위 6에 해당하는 데이터를 모두 전송하였거나, 혹은 THT 시간이 끝났을 경우), 그 다음에 이루어진다. 이 때 전송 가능한 시간은 (TTRT₄ - TRT)이다. 만일 (TTRT₄ - TRT) 값이 양수가 아니면 우선 순위 4는 이번 토큰 회전에는 데이터를 전송할 수 없고 다음 번 토큰을 대기해야 한다. 우선 순위 2와 0의 경우도 우선 순위 4의 경우와 동일하다. 단지 TTRT₄ 대신에 TTRT₂와 TTRT₀를 사용하며, TRT는 계속 증가한다.

IEEE 802.4의 이러한 특성으로 다음과 같은 문제들이 발생한다.

1. 최대 지연 시간 문제

토큰회전시간은 다른 노드의 데이터 트래픽에 의해 영향을 받는다. 따라서 토큰회전시간이 일정하지 않게 된다. 다른 노드들이 데이터를 보내지 않을 경우에는 토큰회전시간이 작아서 긴 시간 동안 데이터를 보낼 수 있다. 반면에 다른 노드들이 데이터를 많이 보내는 경우에는 토큰회전시간이 커져서 짧은 시간 동안만 데

이터를 보낼 수 있다. 또한 토큰회전시간이 일정하지 않기 때문에 개개의 노드에서 데이터를 보내는 시점이 보통 일정하지 않고, 예측을 하기가 매우 어렵다. 이러한 문제로 인해 네트워크에서 소요되는 최대 지연 시간을 결정하기가 어렵다.

2. 주기적인 전송 문제

주기적인 전송은 주기라고 하는 일정한 시간마다 데이터를 전송하는 것이다. 이는 주기 안에 한 번 이상 전송하는 것을 보장하면 지원할 수 있다. 하지만 토큰회전시간이 일정하지 않기 때문에 주기성을 보장하는 것이 어렵다.

3. 문제해결

본 논문에서는 1과 2에 언급한 문제를 해결할 수 있는 방법을 제안한다.

PICNET-NP는 IEEE 802.4를 사용하여 비주기 실시간 데이터의 전송과 경성 실시간 주기 데이터의 전송을 가능하도록 한 네트워크이다. 5장에서는 PICNET-NP에서 실시간 전송을 보장하도록 하는 방법을 제안한다.

V. PICNET-NP에서의 실시간 전송 보장

1. 알고리즘

앞에서 언급하였듯이 PICNET-NP는 IEEE 802.4 토큰버스 프로토콜을 사용한다. IEEE 802.4 프로토콜에서 실시간 전송을 보장하기 위해서는 전송과 관련된 타이머들(THT, TTRT) 잘 설정해야 한다. 기본적으로 THT는 비주기 실시간 데이터와 경성 실시간 주기 데이터를 모두 전송할 수 있도록 설정한다. TTRT는 최악의 경우의 TRT를 미리 계산하여 설정한다. PICNET-NP에서는 TTRT4와 TTRT2 만을 사용한다. 또한 TTRT2는 실시간 특성을 요구하지 않기 때문에 여기서는 고려하지 않는다. 주어진 데이터 정보를 사용하여 각 노드의 THT와 TTRT4를 결정하는 알고리즘은 다음과 같다.

첫째, 네트워크 상의 모든 노드에 대해 비주기 실시간 데이터와 주기 데이터, 그리고 비실시간 데이터의 전송에 필요한 최대 통신 대역을 미리 계산한다. 주기 데이터인 경우에는 경성 실시간 주기 데이터와 연성 실시간 주기 데이터로 구분하여 통신 대역을 계산한다.

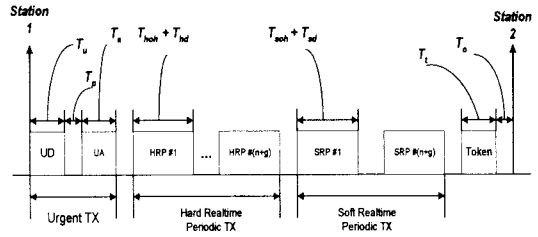
둘째, 비주기 실시간 데이터와 경성 실시간 주기 데이터는 최고 우선순위(6)로 설정한다. 연성 실시간 주기 데이터는 우선 순위 4로 설정한다.

셋째, 계산된 실시간 비주기 데이터의 전송에 필요한 최대 통신 대역과 경성 실시간 주기 데이터

의 전송에 필요한 최대 통신 대역을 더하여 토큰 보유시간(THT, Token Hold Time)으로 설정한다. 식은 다음과 같다.

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

넷째, 첫째에서 계산한 최대 통신 대역을 모두 더한다. 이 값을 TTRT4로 설정하면 다음과 같은 식



- 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_a : 비주기 실시간 데이터에 대한 확인 응답 전송시간
- T_{hoh} : 경성 실시간 주기 데이터 오버헤드 전송시간
- T_{soh} : 연성 실시간 주기 데이터 오버헤드 전송시간
- T_{hd} : 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

그림 2. 데이터 전송의 세 가지 방식
Fig. 2. Three Type Method of Data Transmission

이 된다. ($T_{non-real-time}$ 은 비 실시간 데이터(고급 데이터)에 대해 필요한 통신 대역)

① $n \cdot (n+g) \leq b$ 와 $n \cdot (n+g) \leq c$ 가 성립하면 TTRT4는 다음과 같다.

$$TTRT4 = a \cdot (T_u + T_p + T_a + T_p) + n \cdot (n+g) \cdot (T_p + T_{hoh}) + b \cdot T_{hd} + n \cdot (n+g) \cdot (T_p + T_{soh}) + c \cdot T_{sd} + n \cdot (T_t + T_o) + T_{non-real-time}$$

② $n \cdot (n+g) \leq b$ 와 $n \cdot (n+g) > c$ 가 성립하면 TTRT4는 다음과 같다.

$$TTRT4 = a \cdot (T_u + T_p + T_a + T_p) + n \cdot (n+g) \cdot (T_p + T_{hoh}) + b \cdot T_{hd} + c(T_p + T_{soh} + T_{sd}) + n \cdot (T_t + T_o) + T_{non-real-time}$$

③ $n \cdot (n+g) > b$ 와 $n \cdot (n+g) \leq c$ 가 성립하면 TTRT4는 다음과 같다.

$$TTRT4 = a \cdot (Tu+Tp+Ta+Tp) + b(Tp + Thoh + Thd) + n \cdot (n+g) \cdot (Tp + Tsoh) + c \cdot Tsd + n \cdot (Tt + To) + T_{non-real-time}$$

④ $n \cdot (n+g) > b$ 와 $n \cdot (n+g) > c$ 가 성립하면 TTRT4는 다음과 같다.

$$TTRT4 = a \cdot (Tu+Tp+Ta+Tp) + b(Tp + Thoh + Thd) + c(Tp + Tsoh + Tsd) + n \cdot (Tt + To) + T_{non-real-time}$$

위 식 ①②③④를 간단한 식으로 쓰면 다음과 같다.

$$TTRT4 = \min \{b, n(n+g)\} (T_{hoh} + T_p) + \min \{c, n(n+g)\} (T_{soh} + T_p) + n(T_t + T_o) + a(T_u + T_p + T_a + T_p) + bT_{hd} + cT_{sd} + T_{non-real-time}$$

다섯째, 넷째에서 계산한 TTRT4가 비주기 실시간 데이터의 데드라인보다 작고, 동시에 경성 실시간 주기 데이터 중에서 최소 주기보다도 작으면 넷째에서 계산한 TTRT4를 그대로 사용한다. 만일 넷째에서 계산한 TTRT4가 실시간 비주기 데이터의 데드라인보다 크거나, 경성 실시간 주기 데이터 중에서 최소 주기보다 크면, 넷째에서 계산한 TTRT4에서 비 실시간 데이터에 대한 통신 대역을 빼서 계산한 값을 다시 TTRT4로 설정한다. 이때 비 실시간 데이터의 전송은 실행도중에는 사용하지 않는다.

여섯째, 다섯째의 두 번째 경우에서 계산한 TTRT4가 비주기 실시간 데이터의 데드라인보다 작고, 동시에 경성 실시간 주기 데이터 중에서 최소 주기보다도 작으면 다섯째에서 계산한 TTRT4를 그대로 사용한다. 만일 다섯째에서 계산한 TTRT4가 비주기 실시간 데이터의 데드라인보다 크거나, 경성 실시간 주기 데이터 중에서 최소 주기보다 크면, 다섯째에서 계산한 TTRT4에서 연성 실시간 주기 데이터에 대한 통신 대역을 빼서 계산한 값을 다시 TTRT4로 설정한다. 이때 연성 실시간 주기 데이터의 전송은 실행도중에는 사용하지 않는다.

일곱째, 여섯째의 두 번째 경우에서 계산한 TTRT4가 비주기 실시간 데이터의 데드라인보다 작고, 동시에 경성 실시간 주기 데이터 중에서 최소 주기보다도 작으면 여섯째에서 계산한 TTRT4를 그대로 사용한다. 만일 여섯째에서 계산한 TTRT4가 비주기 실시간 데이터의 데드라인보다 크거나, 경성 실시간 주기 데이터 중에서 최소 주기보다 크면 주어진 데이터 트래픽에 대해서

PICNET-NP로 실시간 전송을 보장할 수 없다.

2. PICNET-NP에의 적용

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, 유니캐스팅, 멀티캐스팅, 브로드캐스팅 3가지 전송방법을 사용한다. 이때, 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, $T_{hoh} = 25$ (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 식 (2)에 대입하면 최악의 경우의 TRT를 구할 수 있으며 이 값이 TTRT4가 된다.

예를 들어 스테이션의 수가 32개이고 주기 데이터가 4개의 그룹으로 나누어져 있을 때, 100개의 긴급 데이터가 사용되고, 1000개의 경성 실시간 주기 데이터와 2000개의 연성 실시간 주기 데이터가 사용된다고 하면 TTRT4는 다음과 같다.

$$TTRT4 = 100(0.0496+0.01+0.0384+0.01) + 1000(0.01 + 0.04 + 0.008) + 2000(0.01 + 0.04 + 0.008) + 32(0.0336+0.04) = 182.1952 \text{ msec}$$

이 경우 긴급 데이터를 183 msec 안에 보낼 수 있고, 주기 데이터를 최소 183 msec의 주기로 보낼 수 있다. 즉, 긴급 데이터의 최소 전송 한도나 경성 실시간 주기 데이터의 최소 주기가 200 msec인 경우 최소 주기를 만족할 수 있으나 182 msec 이하라면 보장할 수 없다.

VI. 결론

본 논문에서는 원자력 발전소 분산 제어 시스템의 제어 네트워크의 요구사항을 분석하고, PICNET-NP를 사용한 실시간 통신방법을 제안하였다. 네트워크 자원을 사전에 스케줄링하여 토큰 회전 시간을 일정한 제한 내에 유지하는 방법을 제안하여 사용함으로써 네트워크에 정의된 최악의 데이터 트래픽 상황에서도 비주기 실시간 데이터의 데드라인과 경성 실시간 주기 데이터에 주기를 만족시킬 수 있는 방법을 제시하였다.

참고 문헌

- [1] *Token Passing Bus Access Method Physical Layer Specification*, ANS/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] Marjory J. Johnson, "Proof that Timing Requirements of the FDDI Token Ring Protocol are Satisfied", *IEEE Transactions on Communications*, Vol. COM-35, No. 6, June 1987.
- [8] Kenneth C. Sevick and Marjory J. Johnson, "Cycle Time Properties of the FDDI Token Ring Protocol", *IEEE Transactions on Software Engineering*, Vol. SE-13, No. 3, March 1987.
- [9] Nicholas Malcolm and Wei Zhao, "The Timed-Token Protocol for Real-Time Communications", *IEEE Computer*, Vol. 27, No. 1, January, 1994.
- [10] Gopal Agrawal, Biao Chen, Wei Zhao, and Sadegh Davari, "Guaranteeing Synchronous Message Deadlines with the Timed-Token Medium Access Control Protocol", *IEEE Transactions on Computers*, Vol. 43, No. 3, March 1994.
- [11] "한국형 원전 DCS (KNX-5) 개발", 전력연구원, 1996. 1.