

# 원자력 발전소 제어계통을 위한 네트워크의 해석과 사례 연구

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

이 성 우, 임 한 석  
(Sung-Woo Lee and Han-Suck Yim)

**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).

**Keywords** : distributed control system, nuclear power plant, aperiodic and periodic real-time data, token rotation time, token hold time.

### I. 서론

최근 원자력 발전의 선진국에서는 원전 제측제어 계통 설계에 대한 신뢰도 및 유지·보수성 향상 등을 통한 발전소 성능 제고와 운전원의 인적 실수를 현저하게 줄임으로서 발전소의 이용률 향상 등을 획기적으로 증가시키기 위한 혁신 방안으로 원자력 발전소에 디지털 제측 제어(I&C, Instrumentation and Control) 시스템을 도입하려는 연구가 활발히 이루어지고 있다. 예로서 ABB-CE사의 차세대원전 모델인 Nuplex 80+ 설계의 경우 완전 전산화된 제측설계를 개발 완료하여 미국의 원자력 규제위원회(NRC)의 설계인증을 취득하였으며[1]. Wesung-house사에서 이와 유사한 개념의 Eagle 21이라는 종합화된 디지털 제어 및 보호계통을 개발하여 영국의 Sizewell B 원전의 안전 및 비안전 계통에 적용하였다[2]. 또한 프랑스의 Merlin-Gerin사에서도 디지털 원자로 제측 및 보호계통을 적용하여 원자로 노심 과 1차 냉각 계통의 운전변수를 신속처리 하여 필요시 원자로를 긴급 정지시키기 위한 신호를 발생시키는 보호 계통을 개발하여 Chooze B 원전에 적용하였다[3].

이러한 연구들은 대부분 원자력 발전소 분산 제어 시스템을 중심으로 이루어지고 있으며, 대부분 최종 결과물만이 공개되고 주요 연구 결과는 공개되지 않고 있는 것이 현실이다. 특히 분산 제어 시스템을 가능하게 하는 동시에 분산 제어 시스템의 성능에 매우 중요한 영향을 주는 네트워크에 대한 연구 결과는 거의 없다. 분산 제어 시스템에 있어 네트워크는 매우 중요한 부분이다. 여러 가지 형태의 네트워크 프로토콜이 제시되어 사용되고 있다.

분산 제어 시스템의 통신망은 적용범위에 따라서 제

측구조를 가지는 경우가 많은데, 이런 경우 보통 IEEE 802.4 토큰 버스 규약[4], IEEE 802.5 토큰 링 규약[5], 그리고 FDDI 규약[6] 등의 통신 규약들은 중위권을 담당하고, 프랑스에서 제안된 FIP[7], 독일에서 제안된 Profibus[8], 그리고 자동차의 통신 규약으로 제안되어 국제 표준으로 자리잡은 CAN[9] 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 규정짓을 수는 없다.

중위권 통신망 규약의 대부분은 논리적 혹은 물리적인 토큰 링 통신망이라고 할 수 있다. 동시에 대부분 광섬유를 통신매체로 지원하여 빠른 전송과 원거리 응용을 지원한다. IEEE 802.5 토큰 링 규약이나 FDDI는 물리적으로 통신망이 링 구조를 가지고 있으며, IEEE 802.4 토큰 버스 규약의 경우도 통신망 자체는 버스 형태를 가지지만 통신망에 연결된 스테이션들은 논리적 링을 구성하게 된다. 따라서 이들 통신망에서는 전송 권한을 나타내는 토큰이 통신망 전체를 회전하는 시간인 토큰 회전 시간이 중요한 성능 지표가 된다.

중위권 통신망과 관련된 네트워크에 대한 연구는 많이 이루어졌다. 동기(synchronous) 데이터 프레임의 전송한다 시간을 보장하는데 필요한 최악의 경우의 토큰 회전 시간에 대한 연구가 있다. FDDI 통신망에서의 최악의 경우의 토큰 회전 시간의 바운드에 대한 두 가지의 중요한 성질들이 증명되었다[10]. 실시간 데이터 프레임의 전송한다 시간을 보장하기 위해 타겟토큰 회전 시간, 토큰 보유시간, 버퍼의 수 등의 통신망 매개 변수를 정하는 방법이 제시되었다[11]. 토큰 보유시간을 할당하는 몇 가지 방법이 [12]에서 제시되었다. 이렇게 최악의 경우의 토큰 회전 시간에 대한 연구는 주로 동기 데이터 프레임을 대상으로 이루어졌다.

그렇지만, 이러한 결과들을 원자력 발전소 분산 제어 시스템에 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. 하지만 기존의 결과들만으로는 이러한 요구사항을 보장할 수가 없다.

본 논문에서는 전력연구원에서 제안한 원자력 발전소 분산 제어시스템 프로토타입인 KNX-5[13]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 제어 통신망의 요구사항들을 분석하고, 3장에서는 문제 설정을 하였다. 4장에서는 경성 실시간 통신을 지원할 수 있는 방법을 제안하였다. 5장에서는 제안한 방법에 대한 실시간 특성을 해석하였다. 6장에서는 현재 가동 중인 원자력 발전소 제어계통[14]을 설정하고 데이터 수와 데이터 특성을 분석하여 제안한 방법을 가지고 원자력발전소 제어계통에 PICNET-NP를 적용하였다. 마지막으로 7장에 결론이 있다.

II. 원자력발전소 분산 제어 시스템의 구조

1. 대상 시스템

전력 연구원에서는 KNX-5라는 원자력 발전소 분산 제어 시스템 프로토타입을 설정하여 연구를 수행하고 있다. KNX-5는 그림 1에 보인 것처럼 4 계층으로 구성된다. 각 계층의 역할은 다음과 같다.

제 1 계층 : 스테이션 계층으로 여러 유닛의 모든 운전 정보 데이터를 감시하고 기술지원센터에도 스테이션 버스에 연결된 컴퓨터로부터 데이터를 제공한다. 스테이션 버스는 플랜트의 여러 지역을 통과하기 때문에 전자파 간섭으로부터 보호하기 위하여 광섬유(Optical Fiber)를 사용한다.

제 2 계층 : 유닛 계층으로서 각 유닛의 운전 조작에 관련된 신호와 데이터를 처리하는 MMI(Man Machine Interface) 기능의 계층이다. 중앙제어실과의 각종 데이터는 유닛 네트워크에서 제공되는데 이 네트워크에는 데이터 통신 유닛과 데이터 수집 컴퓨터와 링크 된다. 한편 여기에서 스테이션 네트워크에도 필요한 데이터를 제공한다. 유닛 네트워크에는 중앙제어실의 CRT 디스플레이를 담당하는 대형 컴퓨터와 연결되어 있고 데이터 로깅, 운전지원기능, 플랜트 효율계산 등을 수행하는 유닛 전체관리 시스템의 컴퓨터와도 링크 된다.

제 3, 4 계층 : 시스템과 현장의 데이터 처리와 제어 기능을 수행하는 단계이고 두 개의 중간 네트워크를 갖추고 유닛 계층과는 데이터 통신 유닛과 데이터 수집 컴퓨터를 통하여 링크 된다.

본 논문이 대상으로 하고 있는 네트워크는 KNX-5에서 2계층과 3계층을 연결하는 제어 네트워크이다. KNX-5에 적용할 제어 네트워크로 제안된 것이 PICNET-NP(Plant Instrumentation and Control NETWORK for Nuclear Power plant)이다[15]. 네트워크 요구사항을 기준으로 제안되었다. PICNET-NP는 제어네트워크의 특성상 사건에 의해 발생하는 긴급 데이터를 처리하기에 좋은 성능을 지니고 있으며, 동시에 주기적으로 발생하는 주기 데이터도 처리할 수 있도록 설계되었다. PICNET-NP는 IEEE 802.3 물리 계층에 IEEE 802.4 MAC와 IEEE 802.2 데이터링크 계층(MAC, LLC)을 접속하고 그 위에 응용 계층을 얹은 구조를 갖는다[16]. PICNET-NP의 물리 계층은 AUI(Attachment Unit Interface) 케이블 및 꼬임 쌍선 케이블을 통해 10Base5 와 10BaseT 매체로 전송한다. 데이터 링크/물리 계층 접속부를 통해 5 Mbps의 속도로 데이터 링크 계층과 접속된다. 관리 기능으로는 루우프백(loopback)의 허용/금지 기능과 송신 허용/금지 기능 등이 있다.

데이터 링크 계층의 MAC 부계층은 IEEE 802.4 토큰 버스 방식을 채택하였고, MAC 부계층과 물리 계층 사이를 연결하는 서비스 변환기를 사용하여 IEEE 802.4와 IEEE 802.3 방식을 각각 만족시켰다. 즉 PICNET-NP의 물리적 신호(physical signaling) 방식은 IEEE 802.3의 방식을 그대로 따르면서 IEEE 802.4 방식의 MAC 부계층-물리 계층 접속 서비스 규격을 만족해야 한다. IEEE 802.3 물리 계층의 검증된 하드웨어 기술이라는 장점과 IEEE 802.4 데이터링크 계층의 토큰 버스 MAC 프로토콜을 접속함으로써 기존에 설치된 IEEE 802.3 용 케이블을 그대로 사용할 수 있도록 하였다. KNX-5를 제어 네트워크를 중심으로 분산 제어 시스템 측면에서 다시 그리면 그림 2와 같은 형태를 갖는다.

이 때 제어 네트워크와 관련된 분산 제어 시스템은 다음과 같은 부분들로 이루어진다. 운전원 스테이션(OIS; Operator Interface Station)은 운전자가 전체 시스템에 대한 제어, 감시 기능을 할 수 있게 하는 장치이다. 엔지니어링 워크스테이션(EWS; Engineering Workstation)은 공정제어 및 감시제어 관련 설계 자료 및 프

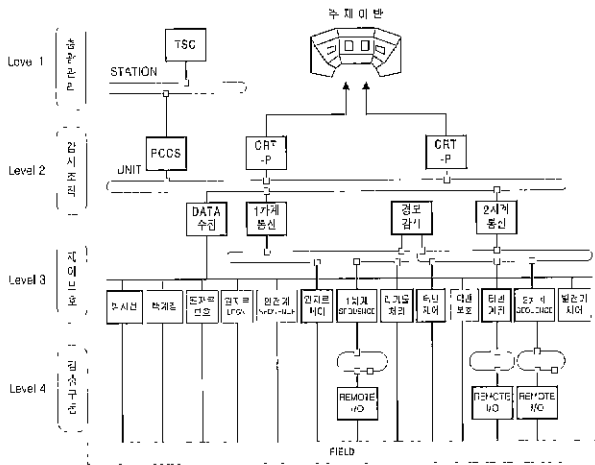


그림 1. KNX-5의 프로토타입.  
Fig. 1. Prototype of KNX-5.

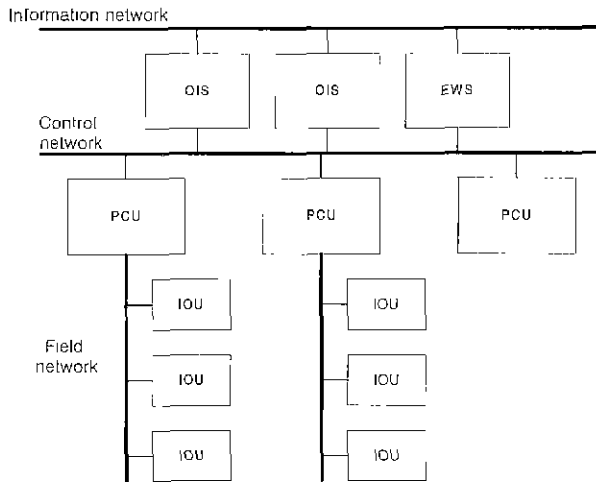


그림 2. 원자력 발전소 분산 제어 시스템의 계통 구조.

Fig. 2. System architecture of DCS in nuclear.

로그를 작성할 수 있는 기능을 제공한다. 공정제어 유닛(PCU; Process Control Unit)은 입출력 유닛으로부터 신호를 입력받아 제어 및 감시 기능을 수행하고, 처리된 결과를 입출력 유닛으로 전송하는 기능을 갖는다. 공정제어 유닛간의 데이터 교환을 통한 연계동작 및 운전원 스테이션과의 연계동작이 일어날 수 있다. 입출력 유닛(IOU; I/O Unit)은 현장에서 수집한 신호를 공정제어기 쪽으로 보내거나 공정제어기에서 보낸 신호를 현장으로 출력하는 기능을 수행한다. 입출력 유닛에서는 signal conditioning 및 기본적인 제어기능을 수행할 수 있다.

## 2. 제어 네트워크의 특성

여기서는 PICNET-NP가 대상으로 하고 있는 제어 네트워크에서 요구되는 특성들을 분석한다. 대표적으로 데이터 트래픽, 네트워크에서 발생하는 지연과 지터, 클럭 동기, 멀티캐스팅과 브로드 캐스팅 등이 있다.

### 2.1 데이터 트래픽

하나의 네트워크 프로토콜은 보통 주기적인 데이터나 비주기 데이터 중 한 가지를 효과적으로 전송한다. 주기적인 데이터를 전송하는 경우에는 네트워크에 발생하는 지터를 줄이는 것이 중요하다. 그리고 주기적인 데이터의 경우에는 미리 각 데이터의 주기를 알 수 있기 때문에 네트워크에 대한 경쟁을 미리 막도록 사전 스케줄링을 할 수 있다. 스포래딕(sporadic) 데이터를 전송하는 경우에는 네트워크에 의한 지연을 줄이는 것이 중요하다. 스포래딕 데이터의 경우에는 데이터가 사건에 의해 발생하기 때문에 네트워크의 서비스를 요구하는 시간을 미리 알 수 없다. 따라서 보통의 경우 데이터에 우선 순위를 지정하여 우선 순위에 의해 네트워크에 대한 경쟁을 해결한다. 이처럼 데이터의 특성에 따라 네트워크에 대한 요구사항이 다르기 때문에 하나의 네트워크 프로토콜이 두 가지를 모두 효과적으로 지원한다는 것은 매우 어려운 일이다. PICNET-NP에서는 본 논문에서 제안하는 방법을 사용하여 스포래딕 데이터를 지원하면서 경쟁 실시간 주기 데이터와 연성 실시간 주기 데이터를 동시

에 지원할 수 있다.

### 2.2 지연과 지터

분산 실시간 시스템은 기본적으로 공유메모리가 없다. 따라서 분산된 각 노드들은 서로 데이터를 주고받으며, 이러한 데이터를 사용하여 동작을 한다. 따라서 데이터의 전송은 실시간 특성을 갖추어야 한다. 보통 데이터 전송은 통신 프로토콜에 따라 시간적 특성을 달리하는데 실시간 통신 프로토콜이 일반 프로토콜과 특히 구분되어야 할 특성으로는 전송시간에 대한 보장과, 작은 지터 등이다. 일반 네트워크에서는 평균 전송 시간이 작을수록 좋은 네트워크 프로토콜로 여겨진다. 하지만 분산 실시간 시스템에서는 최악의 상황을 전제로 분석 및 개발이 이루어지기 때문에 최대 전송시간이 작을수록 좋다. 물론 최대 전송시간은 최악의 경우에도 네트워크가 전송을 보장할 수 있는 시간을 의미한다. 그리고 전송시간의 변화 폭을 지터라 하는데, 지터는 센서 입력이나 구동기 출력과 관련된 데이터 전송의 경우에는 제어에 심각한 영향을 끼칠 수 있다. 따라서 작은 지터를 지원할 수 있는 네트워크 프로토콜이 좋은 프로토콜이라 할 수 있다.

본 논문에서는 통신 지터를 최소화할 수 있는 스케줄링 방법은 고려하지 않았다.

### 2.3 클럭 동기 (real-time clock synchronization)

PICNET-NP는 PICNET-NP에 연결되는 모든 스테이션 사이에 실시간 시간 동기가 이루어 질 수 있도록 하는 기능을 제공한다. 시간 동기의 정확도는 10ms이다. PICNET-NP는 내부에 실시간 clock을 가지고 주기적으로 실시간 동기를 하여 정확도를 유지하여 사용자에게 실시간을 알려준다.

### 2.4 멀티 캐스팅과 브로드 캐스팅

2개 이상의 스테이션에 데이터를 전송해야 할 경우 멀티 캐스팅 혹은 브로드 캐스팅 방법을 사용한다. 멀티 캐스팅의 경우에는 미리 지정한 그룹에 데이터를 전송하는 경우에 사용하고, 브로드 캐스팅의 경우에는 모든 스테이션에 데이터를 보내는 경우에 사용한다. 멀티 캐스팅을 사용하기 위해서는 미리 그룹을 결정해서 송신 측에서 데이터를 해당 그룹 주소를 사용하여 보내면 된다.

## III. 문제 설정

국내·외적으로 매체제어 방식으로 사용하고 있는 통신 프로토콜은 LG사에서 사용한 Mini-MAP, Foxboro의 Node-Bus, Bailey의 Infi-Net, 웨스팅하우스사의 Westnet II 등 여러 가지 형태의 네트워크가 IEEE 802.4 프로토콜을 사용하여 제안되었다[17]. 그 중에서 대표적으로 MAP(Manufacturing Automation Protocol)[18]이 제안되었다. 하지만 MAP은 성공을 하지 못하였다는 것이 일반적인 결론이다 여러 가지 이유 중에서 하나는 실시간 특성을 보장하기가 어렵다는 것이다. 이는 IEEE 802.4 프로토콜의 특성으로부터 나온다.

IEEE 802.4 토큰 버스 네트워크에서는 네트워크의 전송권한이 토큰에 의해 제어된다. 토큰을 소유한 노드만이 통신 매체를 사용할 수 있는 권한이 있다. 네트워크 상의 각 노드들은 물리적으로 버스를 통해 연결되어 있

으며, 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(TTTR, 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 TTTR와 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. TTTR은 우선 순위 0, 2, 4에 대해 각각 존재하며(TTTR4, TTTR2, TTTR0) 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(TTTR4 - TRT)이다. 만일 (TTTR4 - 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 TTTR4 대신에 TTTR2와 TTTR0를 사용하며, TRT는 계속 증가한다. IEEE 802.4의 이러한 특성으로 다음과 같은 문제들이 발생한다

#### 1. 최대 지연 시간 문제

토큰 회전시간은 다른 노드의 데이터 트래픽에 의해 영향을 받는다. 다른 노드들이 데이터를 보내지 않을 경우에는 토큰 회전시간이 작아서 매우 짧은 시간 동안 해당 우선 순위 데이터를 보낼 수 있다. 반면에 다른 노드들이 데이터를 많이 보내는 경우에는 토큰 회전 시간이 커져서 작은 시간 동안 해당 우선 순위 데이터를 보낼 수 없다. 게다가 토큰 회전 시간이 일정하지 않기 때문에 개개의 노드에서 데이터를 보내야 하는 시점은 보통 일정하지 않다. 따라서 예측을 하기가 매우 어렵다. 이러한 문제로 인해 네트워크에서 최대 지연 시간을 결정하기가 어려워진다.

#### 2. 주기적인 전송 문제

주기적인 전송은 일정한 시간 간격으로 데이터를 전송하는 것이다. 주기성에는 일정 시간(주기) 안에 한 번 이상 전송을 하는 것과 일정한 시간 간격으로 맞추어서 전송(정 주기)을 하는 두 가지가 있다. 하지만 토큰 회전

시간을 일정하게 맞출 수 없기 때문에 IEEE 802.4를 사용하여 정 주기(Deterministic periodicity)를 지원하는 것은 거의 불가능하다 또한 주기 안에 한 번 이상 전송하는 것을 보장하는 것도 쉽지가 않다. 우선, 주기가 최대 토큰 회전 시간보다 커서면 만족시킬 수 없다. 게다가 IEEE 802.4에서 최대 토큰 회전 시간은 각 노드의 데이터 트래픽에 영향을 받기 때문에 각 노드의 데이터 트래픽이 불규칙하면 쉽게 구할 수 없다.

### IV. PICNET-NP를 사용한 실시간 통신

#### 1. PICNET-NP의 기본 사양

PICNET-NP는 그림 2에서 보인 제어 네트워크를 위해 개발한 네트워크 프로토콜이다. PICNET-NP는 버스 형태의 네트워크 프로토콜이다. 전송 매체로는 동축(coaxial) 케이블과 꼬임 쌍선(twisted-pair) 케이블을 사용한다. 그리고 트랜시버 등의 장비를 이용하여 광섬유(fiber optic) 케이블도 이용할 수 있도록 한다. 최대전송 거리는 별도의 확장 기기 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.

#### 2. PICNET-NP의 통신 서비스

PICNET-NP는 긴급 통신 서비스, 경성 실시간 주기 통신 서비스, 연성 실시간 주기 통신 서비스 및 여러 통신 기능을 제공하는 고급 통신 서비스를 제공한다.

**긴급 통신 서비스 :** 비 주기적으로 긴급한 내용을 담고 발생하는 통신 요구를 처리할 수 있는 긴급 통신 서비스를 제공한다. 일정한 전송 시간 및 확인(Acknowledgement)을 포함하는 응답시간을 보장한다. 필요한 경우 데이터 링크 계층 레벨의 acknowledge를 확인하는 과정을 제공할 수 있다. 발생한 사건의 종류나 전송하고자 하는 데이터의 종류를 나타내는 정보 및 필요한 경우 데이터의 내용과 상태를 보낼 수 있다.

**경성 실시간 주기 통신 서비스 :** 주기적으로 일정한 데이터를 보내는 통신 서비스를 처리하기 위해 경성 실시간 주기 통신 서비스를 제공한다. 이 서비스는 통신장애가 발생하지 않을 경우, 주기성을 엄격히 보장한다. 여기서 주기성을 엄격히 보장한다는 것은 정해진 주기 내에 한 번 이상 서비스가 처리되는 것을 의미한다. 주기 통신 서비스에서는 전송시의 부하를 줄이기 위해서 주기 데이터 초기화 과정에서 데이터 전송에 대한 스케줄링을 한다.

**연성 실시간 주기 통신 서비스 :** 주기적으로 일정한 형식의 내용을 보내는 통신 서비스를 처리하기 위해 연성 실시간 주기 통신 서비스를 제공한다. 이 서비스는 정해진 주기 내에 한 번씩 서비스가 처리되도록 하되 약간 정도의 시간지연을 허용한다. 하지만 긴급 통신 서비스의 영향이나 일시적인 통신장애가 발생하지 않는 경우는 주기성을 지킨다. 주기 통신 서비스에서는 전송시의 부

하를 줄이기 위해서 주기 데이터 초기화 과정에서 데이터 전송에 대한 스케줄링을 한다.

고급 통신 서비스 : 비 주기적으로 발생하는 사용자의 다양한 통신 요구를 처리할 수 있도록 하는 고급 통신 서비스를 제공한다. 고급 통신 서비스는 기본적으로 다음의 기능을 포함한다.

- 시스템 정보 관련 서비스 : 시스템 식별 요구/응답, 상태 요구/응답
- 각종 긴 데이터의 신뢰성 있는 전달 및 획득 : 업 로드, 다운로드
- 통신망을 통한 프로그램의 원격 제어 : 생성, 시작, 정지, 재시작, 삭제, 제거

PICNET-NP 고급 통신 서비스는 최대 1 Mbyte의 데이터를 전달할 수 있다.

3. PICNET-NP에서의 우선 순위 할당

PICNET-NP에서는 비주기 실시간 데이터를 위한 긴급 통신 서비스와 경성 실시간 주기 데이터를 위한 주기 서비스에 우선 순위 6을 사용하고, 연성 실시간 주기 통신 서비스에는 우선 순위 4를 사용한다. 그리고 고급통신 서비스에는 우선 순위 2를 사용한다.

4. 데이터의 정의 및 길이 규정

여기서는 PICNET-NP에서 사용하는 프레임을 기술한다. 기술된 프레임은 분산 제어 시스템에서 요구되는 데이터를 고려하여 결정하였으며 V장에서 실시간 특성을 분석할 때 사용된다.

4.1 토큰 프레임 구조

IEEE 802.4 토큰버스 규격[4]에 정의되어 있는 프레임을 사용한다. 21 옥텟으로 이루어지며, 토큰 프레임의 전송 시간은 33.6  $\mu$  sec이다.

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

4.2 데이터 프레임

(21+L) 옥텟으로 이루어지며, 전송시간은 (21+L)\*8\*0.2  $\mu$  sec이다. 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 : 12바이트로 이루어지며 구조는 다음과 같다. 따라서 긴급 데이터 전송을 위한 프레임의 길이는 33바이트가 되며 33 옥텟 타임의 시간이 소모된다.

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

확인 데이터(ACK) : 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 : 주기 데이터는 여러 개가 한 번에 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	두 번째 주기데이터	...	k 번째 주기데이터
1	1	1	1	2	2	1	5	...	5

고급 데이터 : 긴급 데이터나 경성 실시간, 연성 실시간 주기 데이터와는 달리 일정한 길이를 가지지 않는다.

Dsap	Ssap	Ctrl	고급 데이터
1	1	1	

5. PICNET-NP에서의 데이터의 전송

PICNET-NP에서의 데이터 전송은 그림 3과 같은 순서로 이루어진다. 최악의 경우 비주기 실시간 데이터와 (urgent TX) 경성 실시간 주기 데이터를(hard real-time periodic TX) 전송한다. 그 다음에 연성 실시간 주기 데이터를 전송(soft realtime periodic TX) 한다. 그 다음에 시간 여유가 있으면 고급 데이터를 전송한다. 그림 3에는 연성 실시간 주기 데이터의 전송까지만 나타나고 있다.

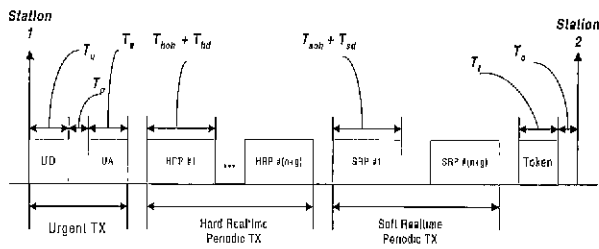
최악의 경우라고 하는 것은 토큰이 한번 도는 동안 통신망에 정의된 모든 긴급데이터, 경성 실시간 주기데이터, 연성 실시간 주기데이터가 전송을 요구하는 경우라고 할 수 있다. 또한 최악의 경우를 가정하기 위해서 긴급데이터의 전송에 가장 많은 시간을 필요로 하는 L\_DATA\_ACK를 사용한다고 하자. 그리고 주기데이터는 모든 스테이션에 각각 보내는 데이터, 모든 그룹에 보내는 데이터, 그리고 모든 스테이션에 보내야 하는 데이터가 모두 있다고 가정하자.

이러한 가정을 사용하면, 한 스테이션이 수행하게 되는 최대 주기 전송 횟수는 자신을 제외한 (n-1)개의 스테이션에 보내는 전송, g개의 그룹에 보내는 전송, 그리고 모든 스테이션에 보내는 한번의 전송 등이 있다. 따라서 주기 전송의 횟수는 최악의 경우에 (n+g)가 된다. 물론 스테이션에 따라서는 (n-g)보다 작은 횟수의 주기 전송을 할 수도 있으나 TRT 계산을 위해서 최악의 경우를 가정하기 위해서 (n+g)로 하여 계산한다.

V. PICNET-NP에서의 실시간 특성 분석

1. 알고리즘

앞에서 언급하였듯이 PICNET-NP는 IEEE 802.4 토큰버스 프로토콜을 사용한다. IEEE 802.4 프로토콜에서



- $n$  : 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
- $T_{boh}$  : 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 3. 데이터 전송에 세 가지 방식을 사용.  
Fig. 3. The three methods for data transmission.

실시간 전송을 보장하기 위해서는 전송과 관련된 타이머들을(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 TTRT2만을 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, 비 실시간 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 우선 순위(6)로 설정한다. 연성 실시간 주기 데이터는 우선 순위 4로 설정한다.

셋째, 계산된 실시간 비주기 데이터의 전송에 필요한 최대 통신 대역과 경성 실시간 주기 데이터의 전송에 필요한 최대 통신 대역을 더하여 토큰보유시간(THT, Token Hold Time)으로 설정한다. 식은 다음과 같다.

$$THT_i = a_i(T_u + T_p + T_a + T_b) + (n+g)(T_p + T_{boh}) + b_i T_{hd} \quad (1)$$

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

한, 경우 ①, ②, ③, ④와 같이 부등호를 사용하여 구별한 것은 최악의 경우  $n(n+g)$  보다 경성 실시간 주기 데이터, 연성 실시간 주기 데이터( $b, c$ )가 작은 경우에는 최악의 조건( $n(n+g)$ )을 적용하지 않더라도 식  $b(T_p + T_{boh} + T_{hd})$ ,  $c(T_p + T_{soh} + T_{sd})$ 을 적용함으로써 데이터 전송 효율면에서 효과적이다.

( $T_{non-real-time}$ 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.

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

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

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

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

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

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

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

위 식 ① ② ③ ④를 간단한 식으로 쓰면 다음과 같다.

$$TTRT4 = \min\{b, n(n+g)\}(T_{boh} + T_p) + \min\{c, n(n+g)\}(T_{soh} + T_p) + n \cdot (T_t + T_o) + a(T_u + T_p + T_a + T_p) + bT_{hd} + cT_{sd} + T_{non-real-time} \quad (2)$$

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. 이 때 비 실시간 데이터의 전송은 실행도중에는 사용하지 않는다.

여섯째, 다섯째의 두 번째 경우에서 계산한 TTRT4가 비주기 실시간 데이터의 데드라인보다 작고, 동시에 경

성 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. 이 때 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.

또한, 요구응답 시간이 최악의 TRT 보다 커지는 경우는 네트워크 내의 노드 수를 줄이거나 데이터의 수를 줄여 한다.

## 2. 최대 전송 지연에 대한 분석

### 2.1 긴급 데이터의 최대 전송 지연 시간

토큰보유시간(THT)이 긴급 데이터를 전송하기에 충분하도록 설정되었음을 가정하고 분석하였다.

L\_DATA를 사용하는 경우 : L\_DATA를 사용하는 경우, 응답 시간은 사건이 발생한 후 상대 스테이션에 전달될 때까지의 시간이다. 이 경우 최대 응답 시간은 사건이 발생한 스테이션이 토큰을 획득하여 데이터를 전송할 때까지의 시간이 된다. 따라서  $TRT_{max}$ 가 된다.

L\_DATA\_ACK를 사용하는 경우 : L\_DATA\_ACK를 사용하는 경우, 응답 시간은 사건이 발생하는 시점부터 사건에 대한 데이터를 받은 스테이션으로부터 확인을 받을 때까지의 시간이다. 이 시간은 사건 발생 후 L\_DATA\_ACK 전송 스테이션이 토큰을 획득할 때까지의 시간과 확인을 보낼 스테이션이 토큰을 획득하는 시간을 합한 것이다. 이 시간은 각각 최대  $TRT_{max}$ 이다. 따라서 최대 응답 시간은  $2TRT_{max}$  이하이다.

$T_p$ 의 크기 : 이 값은 receiver blanking의 크기를 기준으로 설정되어 24 MAC symbol time이 걸리게 되어 있다. 즉  $4.8 \mu s$ 이다. 그런데 실제로 구현 시 필요한 여유분을 생각해서  $T_p$ 는  $10 \mu s$  이하를 보장한다.

### 2.2 긴급, 주기, 고급 전송에 관계된 큐의 개수

긴급 데이터와 경성 실시간 주기 데이터는 class 6의 전송 큐를 이용해서 전송하게 되는데, 이 큐의 크기에 의해 긴급 데이터와 경성 실시간 주기 데이터의 개수도 물리적으로 제한 받게 된다. 긴급 데이터의 최대 전송 지연 시간은  $TRT_{max}$ 이므로 이 기간 동안 발생할 수 있는 긴급 데이터와 경성 실시간 주기 데이터의 개수를 고려하여 큐의 개수를 결정해야 한다.

연성 실시간 주기 데이터는 class 4의 전송 큐를 이용해서 전송하게 되는데, 이 큐의 크기가 제한됨에 따라서 큐를 이용하는 연성 실시간 주기 데이터의 개수도 물리

적으로 제한 받게 된다.

고급데이터는 class2의 전송 큐를 이용해서 전송하게 된다.

## VI. 원자력 발전소 데이터 분석 및 적용

PICNET-NP를 원자력 발전소의 제어 계통에 적용하기 위하여 영광 원자력 발전소를 대상으로 하여 각 제어 계통의 특성과 데이터를 분석하였다[19]-[23].

### 1. 원자력 발전소 제어계통

원자력발전소 제어계통은 여러 제어계통으로 이루어져 있다. 각 제어계통 별로 간단히 설명하면 다음과 같다.

원자로 제어계통(Reactor Regulation System, RRS)은 핵증기 공급계통(Nuclear Steam Supplier System, NSSS) 제어 캐비닛에 설치되어 있으며 다음과 같은 기능을 수행하기 위하여 필요한 제측제어 설비로 구성된다.

1) 100% 출력 주증기 압력조건을 만족시키기 위하여 냉각재계통(RCS)의 평균온도(TAVG)를 터빈부하의 함수로서 유지시킨다.

2) 냉각재 평균온도(TAVG)를 냉각재 기준온도(TREF)의 불감대(Dead Band) 이내로 유지시키기 위하여 제어봉 구동장치 제어계통(CEDMCS)에 제어봉 구동신호를 보낸다.

3) 가압기 수위제어계통의 제어 및 디스플레이를 위하여 냉각재 평균온도에 따라 프로그램된 가압기 수위 프로그램 신호를 발생한다.

4) 발전소를 15%에서 100% 출력사이에서 운전하고 있을 때 다음 각각의 발전소 상태에서 핵증기 공급계통 제어계통과 함께 냉각재 평균온도와 원자로 출력을 자동으로 제어한다.

5) 운전원이 계통의 운전상태를 쉽게 확인하고 TAVG의 수동제어를 용이하게 하기 위한 지시기능을 제공한다.

6) 증가우회 제어계통(SBCS)에 냉각재 평균온도(TAVG), 원자로 출력, 제어봉(CEA) 자동인출 요구신호 및 터빈 부하신호를 제공한다.

7) 원자로 제어계통에서 사용하고 있는 TAVG는 터빈 출력 및 원자로 출력의 잉여 신호를 제공한다. 신호 선택스위치는 고장난 채널을 제거시킬 수 있도록 하여 계통의 이용률을 증가시키며 유사한 채널의 신호편차경보를 신호 고장시에 운전원에게 경보를 제공하고 제어봉 자동 이동금지(AMI) 신호를 발생한다. 원자로 제어봉은 TAVG가 프로그램된 설정치로부터 편차가 크게 발생하는 경우에 제어봉 자동 인출금지(AWP) 신호를 발생한다. 또 다른 AWP 신호는 냉각재 저온판 온도( $T_{COLD}$ )가 높은 경우에 발생된다. 이것은 기기 고장에 의하여 제어봉이 계속해서 자동으로 인출되는 것을 방지한다. 원자로 제어계통은 발전소 자료수집계통(PDAS)에 입력신호 편차정보 TAVG, TREF 정보들을 제공한다.

터빈 부하의 함수로서 프로그램된 설정치( $T_{REF}$ )와 일치하도록 냉각재 평균온도(TAVG)를 조절한다.

원자로 출력 급 감발 계통(Reactor Power Cutback System, RPCS)은 과도현상에 대응하기 위한 계통이다.

일반적으로 핵증기 공급계통(NSSS)은 적은 부하변동이나 계통 외란에 적용할 수 있도록 설계된다. 터빈-원자로 출력이 일치되지 못하면 원자로 제어계통(RRS), 주증기 우회제어계통(SBCS), 주급수 제어계통(FWCS)과 가압기 수위 및 압력 제어계통(PLCS, PPCS)이 상호 조화를 이루어 동작됨으로서 이를 극복해낸다. 그러나 어떤 큰 과도현상 즉 대형부하 탈락이나 운전중인 2대의 주급수 펌프 중 한 대가 트립된 경우 등은 이들 제어계통으로도 감당해낼 수 없기 때문에 원하지 않은 원자로 정지가 유발될 수도 있다.

이러한 과도현상에 대비하여 원자로 출력 급 감발 계통(RPCS)은 선택된 제어봉 부그룹(subgroup)을 노심 바닥에 낙하(cutback)시키고 터빈 출력을 신속하게 감소(setback/runback)시킨다.

원자로 출력은 RPCS 동작 전 초기원자로 출력에 따라 20-75% 사이에서 안정되고 터빈출력은 setback/runback에 의해 원자로 출력에 맞추어진다. SBCS와 RRS의 동작범위는 75% 이내의 용량을 조절하는 범위내에서 동작된다.

가압기 압력 제어계통(PPCS)은 임의의 크기의 부하 감발, 급수펌프 2대 운전 중 1대 상실, 15%와 100% 출력사이에서 분당 5% 부하 비율 변화 등의 과도상태에서 가압기 및 냉각재 계통 압력을 자동으로 제어하는 계통이다. 안전상태 운전조건에서 약간의 변동이 있을 경우 요구되는 압력 설정치(2,250Psia)로 압력을 자동으로 유지시킬 수 있도록 한다.

가압기 수위 제어 계통(PLCS)은 냉각재 계통의 운전 압력을 일정하게 유지시켜 냉각재를 포화온도 이하로 유지시키고 과도 상태시 발생하는 냉각재의 체적변화를 보상하는 완충탱크(surge tank)의 역할을 담당한다.

주급수 제어계통(FWCS)은 급수 용량을 조절하여 증기 발생기 수위를 적절하게 유지시킨다. 원자로 고출력(20% 이상) 상태에서는 3요소 급수제어 방법으로서 급수용량 제어에 증기용량, 급수용량 및 증기발생기 수위 신호가 사용되고, 원자로 저출력(20% 이하) 상태에서는 단일요소 급수제어 방법으로서 급수용량제어에 증기발생기 수위가 이용된다. 급수제어계통은 다운콤마 밸브와 이코노마이저 밸브의 개도와 급수펌프의 속도를 조절함으로써 증기발생기의 수위를 제어한다.

증기 우회 제어 계통(SBCS)은 운전 중 터빈 정지등의 부하 감발시에도 원자로 감발 계통(RPCS)과 조화를 이루어 원자로 정지 없이 1차 계통과 2차 계통의 에너지 평형상태를 유지하는 역할을 수행한다. 원자로 제어계통(RRS)은 10% 스텝(step) 변화 및 5%/min 램프(ramp) 변화까지는 원자로 출력과 냉각재 평균온도 ( $T_{AVG}$ )를 설정치 이내로 유지시킬 수 있도록 되어있다. 그러나 더 큰 부하 감발을 감당하고 원자로 출력을 가능한 한 높게 유지시키기 위해서는 인위적인 증기부하 감발이 필요하다. 전부하(100%) 감발시 원자로 정지 없이 발전소를 안정화시키기 위해서는 아주 대용량의 터빈 우회계통과 복수기가 필요한데 이러한 용량요구를 최소화시키기 위해

서 원자로 출력 감발 계통과 원자로 제어계통이 같이 이용된다.

그 결과 증기 우회제어계통의 증기우회용량은 복수기 베기 40%, 대기덤프 15%로 총 55%의 증기우회 용량을 감당하고 나머지 잉여출력은 원자로 출력감발 계통과 원자로 제어계통에서 원자로 출력을 조절하여 1,2차 계통간 에너지 평형을 유지시킨다.

제어봉 구동장치 제어계통(CEDMCS)은 제어봉 구동장치를 움직이는 제어신호 및 구동전원을 제공하고 제어봉 구동장치는 노심에 있는 제어봉 집합체를 구동(인출 또는 삽입)시킨다. 제어봉 집합체는 열증성자에 대해 높은 미시적 흡수 단면적을 가지고 있는 붕소( $^{10}B$ ) 동위원소로 이루어져 있다. 이러한 특성에 의해 제어봉 집합체가 노심에 삽입되면 부 반응도 첨가되고 노심에서 인출되면 정반응도가 첨가된다.

제어봉 구동장치 제어계통의 기능은 제어봉 집합체에 붙어있는 제어봉 구동장치를 제어하는 것이다. 또한 제어봉 집합체는 노심의 중성자속 준위와 분포를 제어한다.

2. 원자력 발전소 제어계통의 데이터 분석

원자력 발전소 제어계통의 기능과 아날로그 접점, 디지털 접점 수 등을 기초로 디지털 통신에 사용될 데이터를 분석하였다[24]. 결과를 데이터의 종류별로 표 1에 정리하였다.

표 1에 표기된 데이터 수는 원자로 제어 계통에서 발생할 수 있는 모든 데이터를 분석한 것이다. 따라서, 토 큰 1회전마다 발생하는 최악의 경우의 데이터 개수이다. 또한, 토 큰 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.

시스템에 정의된 긴급데이터, 경성 실시간 주기 데이터, 연성 실시간 주기 데이터는 발생 가능한 모든 경우를 고려해서 데이터를 분석하였기 때문에 일정하다. 그 래야 원자력 발전소의 실시간을 만족 할 수 있다.

표 1. 원자력 발전소 제어 계통의 데이터 수.

Table 1. The number of data of control systems in nuclear power plants.

시스템 \ 데이터수	긴급 데이터	하드실시간 주기데이터	소프트실시간 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



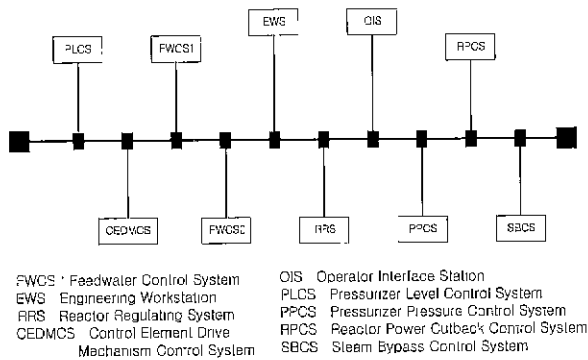


그림 4. 제어시스템의 네트워크.  
Fig. 4. Network of control system.

3. 원자력발전소 제어시스템에 PICNET-NP를 적용

기존의 원자력발전소 제어시스템은 디지털 통신망을 사용하지 않고 점대점(Point-to-point)으로 직접 연결하여 사용하였다. 이로 인해 시스템이 지나치게 거대해지고 설치비용도 많이 들었으며, 유지 보수가 어려워졌다. 이 제어시스템에 PICNET-NP를 적용한다면 그림 4와 같은 형태가 될 수 있다.

그림 4를 보면 추가적으로 EWS, OIS 등의 시스템이 네트워크에 연결되어 있다. 이 부분에 대해서는 2장에서 하였다. 나머지 시스템들은 각각이 PCU에 해당된다고 보면 된다. 여기에 표 1에서 얻은 데이터 자료를 사용하여 PICNET-NP가 원자력발전소 제어시스템의 디지털 통신망으로 적합한지를 분석하였다.

실제 원자력 발전소에서 요구하는 응답시간은 구동기기에 따라서 약간의 차이는 있으나 계통간의 응답시간(PCU와 PCU)은 100ms - 250ms이고, PCU와 OIS 사이의 응답 시간은 250ms - 500ms로 차세대 한국형 원자로 기술 보고서에[25] 제시되어 있다.

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,  $T_{boh} = 25$  (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 (2)에 대입하면 최악의 경우의 TRT를 구할 수 있으며 이 값이 TTRT4가 된다. 데이터 전송 시간적 성능 계산 방법을 사용하여 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 4의 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.

Ⅶ. 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 비주기 실시간 데이터, 주기 실시간 데이터에 대한 경성 실시간, 연성 실시간 데드라인을 만족할 수 있다는 것을 보였다. 제안된 방법을 시뮬레이션하기 위하여 현재 가동중인 원자력 발전소 제어시스템을 설정하였다. 설정된 발전소 제어 시스템의 데이터 수와 데이터 특성을 분석하여 최악의 경우에 타켓 토큰 로테이션 타임(TTRT4)을 구한 결과 원자력 발전소에서 요구하는 응답시간 100ms를 만족함을 보였다.

참고문헌

- [1] Westinghouse Technical Description for an Eagle 21 Process Protection System 46700-92-120.
- [2] System 80+ Standard Design Volume 9, Chapter 7.
- [3] B. Appell, "Putting in a Replacement for Controlbloc P20 at Chooze B," *Nuclear Engineering International*, pp. 45-47. July, 1992.
- [4] Token Passing Bus Access Method Physical Layer Specification, *ANSI/IEEE Standard 802.4*, 1985.
- [5] Token Ring Access Method and Physical Layer Specification, *IEEE Standard 802.5*, 1983.
- [6] FDDI Token Ring Media Access Control, *ANSI Standard X3.139*, 1987.
- [7] General Purpose Field Communication System, prEN 50170, WorldFIP, 1995.
- [8] DIN 19 245 Profibus Standard, Profibus Trade Organization, 1993.
- [9] Road vehicles-Interchange of digital information Controller area network(CAN) for high-speed communication, *ISO 11898*, 1993.
- [10] M. J. Johnson, "Proof that timing requirements of the FDDI token ring protocol are satisfied," *IEEE Trans. Communications*, vol. COM-35, no.

6, June, 1987.

[11] N. Malcolm and W. Zhao. "The timedtoken protocol for real-time communications." *IEEE Computer*, vol. 27, no. 1, January, 1994.

[12] G. Agrawal, B. Chen, W. Zhao, and S. Davari, "Guaranteeing synchronous message deadlines with the timedtoken medium access control protocol." *IEEE Trans. Computers*, vol. 43, no. 3, March, 1994.

[13] "한국형 원전 DCS (KNX-5) 개발," 전력연구원, 1996. 1.

[14] "표준 경수로 계통 설비(하)," 한국전력공사 영광 원전 훈련 센터, 1996. 4.

[15] 이성우, 임한석 "원자력 발전소 분산제어 시스템 을 위한 중위 계층 통신망의 성능 분석," 대한전기학회 학회 학술대회, pp. 2537-2539, 1998. 7.

[16] J.-Y. Lee, H.-J. Moon, S.-Y. Moon, W. H. Kwon, S. W. Lee, and I. S. Park, "Token passing bus access method on the IEEE 802.3 physical layer for a distributed control system." *DCCS'98*, pp. 31-36, 1998.

[17] 원전 DCS 설계 기준서 개발 Volume 7-2, 통신계통. 1998.

[18] A. Valenzano, C. Demartini, L. Ciminera, *MAP and TOP Communications : Standards and Applications*, Addison-Wesley, 1992.

[19] Instrument Set points for Reactor Regulating, Feedwater control, and Steam Bypass Control Systems for Yonggwang Nuclear Power Plant Units 5&6 "Design Data Status 1," Project DWG NO : 9-500-Z-447-001, 1998.

[20] System Description for Pressurizer Control System for Yonggwang Nuclear Power Plant Units 5&6 "Design data status 1," Project DWG NO : 9-743-Z-403-001, 1997.

[21] Yonggwang Nuclear Power Plant Units 5&6 "Design data status 1," Steam Bypass Control System Functional Block Diagram, Feedwater Control System Functional Block Diagram, Reactor Regulating System Functional Block Diagram, 1997.

[22] Technical Evaluation Report for The CEDMCS and RPCS Design Changes for Yonggwang Nuclear Power Plant Units 3&4, 1995.

[23] Technical Manual for Control Element Drive Mechanism Control System Ulchin Nuclear Power Plant Units 3&4, 1995.

[24] 이성우, 문홍주, "원자력 발전소 제어계통 Data Point 조사," 전력연구원 자체 보고서, 1998.

[25] 차세대 한국형 원자로 기술보고서, N-740-EJD 460-001 I&C Overall Analysis & Design Report. pp. 1-96, 1998.



**이 성 우**

1960년 9월 29일생. 1987년 대전산업대 전기공학과 졸업, 1989년 건국대학교 대학원 전기공학과 졸업(석사), 1999년 동 대학원 박사과정. 현재 한국전력공사 전력연구원 선임연구원. 관심분야는 분산제어 시스템, 산업용

통신망, 기기 검증 시스템 등.



**임 한 석**

1935년 12월 21일생. 1962년 서울대 공대 전기공학과 졸업, 1972년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사), 1986년 홍익대 대학원 전기공학과 졸업(공학박). 현재 건국대 공대 전기공학과 교수. 관심분야는 전력계통해석 및

전력 수요 예측 시스템.