

원전 MMIS 플랫폼의 PROFIBUS 통신 신호 무결성에 관한 연구

김현기, 임희택

(주)한국수력원자력 중앙연구원

hyunkikim@khnp.co.kr, heetaeklim@khnp.co.kr

A Study on Signal Integrity of PROFIBUS Communication in Nuclear Power Plants MMIS Platforms

Kim Hyun Ki, Lim Hee Taek

Korea Hydro & Nuclear Power Co., Ltd.

요 약

본 논문은 MMIS (Man-Machine Interface System) 플랫폼에 적용된 PROFIBUS 통신을 대상으로 신호 무결성 관점의 정량적 분석을 수행하였다. HyperLynx 시뮬레이션을 통해 Total Jitter Eye Opening, Skew를 평가하였으며 분석 결과 PROFIBUS 통신이 원전의 환경에서도 안정적인 통신 성능을 만족함을 확인하였다.

I. 서론

원전의 MMIS 플랫폼에서는 공정 제어, 상태 감시, 안전 기능 수행을 위해 신뢰성이 높은 통신 기술이 필수적이다. 특히 원전과 같은 산업 환경에서는 강한 전자기 간섭(EMI), 장거리 배선, 다중 노드 연결 등의 조건에서도 안정적인 데이터 전송이 요구된다. 이러한 요구사항을 만족하기 위해 PROFIBUS (Process Field Bus) 통신은 오랜 기간 산업용 통신 표준으로 널리 사용되어 왔다 [1].

PROFIBUS는 RS-485 기반의 차동 신호 방식을 사용하여 최대 수 Mbps 급 데이터 전송 속도를 지원하며, 마스터-슬레이브 구조를 통해 실시간성과 결정성을 확보한다. 그러나 최근 산업 제어 시스템의 고집적화 및 MMIS에서는 다중 보드 연결, 커넥터, 케이블 등의 물리적 요소가 통신 신호 무결성 (Signal Integrity, SI)에 미치는 영향이 점차 중요해지고 있다.

본 연구에서는 MMIS 플랫폼의 PROFIBUS 통신 경로를 대상으로 SI 관점에서의 정량적 검증을 수행하였다. 이를 위해 Siemens사의 HyperLynx SI 해석 툴을 활용하여 실제 배선 구조와 유사한 전송선 모델을 구성하고 Eye Diagram 및 Jitter 분석을 통해 통신 품질을 모의 평가하였다. 본 논문에서는 PROFIBUS 통신이 신호 무결성 측면에서 요구 성능을 만족하는지 여부를 검증하고, 향후 설계 시 고려해야 할 SI 관점의 시사점을 도출하는 데 있다 [2].

II. 본론

PROFIBUS 통신은 RS-485 기반의 차동 신호 방식을 사용하는 산업용 필드 버스 통신으로 공통 모드 노이즈에 대한 내성이 우수하여 전자기 간섭 환경에서도 안정적인 데이터 전송이 가능하다. 마스터, 슬레이브 구조를 채택하여 통신 순서와 타이밍이 명확히 정의되며 이로 인해 산업 제어 시스템에서 요구되는 결정적 통신 특성을 만족한다. 또한 멀티 드롭 토폴로지를 통해 다수의 슬레이브 장치를 하나의 버스에 연결할 수 있어 시스템 확장성이 뛰어난 장점이 있다. 반면, 전송 속도가 수 Mbps 수준으로 제한되어 고속 데이터 처리가 필요한 응용에는 제약이 있으며, 케이블 길이, 종단 저항 설정, 보드 간 연결구조에

따라 신호 품질이 민감하게 변화할 수 있는 한계가 존재한다 [3].

본 연구에서는 이러한 PROFIBUS 통신의 물리 계층 특성이 MMIS 플랫폼 환경에서 신호 무결성에 미치는 영향을 분석하기 위해 HyperLynx 기반 SI 시뮬레이션을 수행하였다. 시뮬레이션 모델은 실제 MMIS 플랫폼 구조를 반영하여 PROFIBUS 송신기 및 수신기 모델, PCB 트레이스, 커넥터, Backplane PCB 등을 포함하여 구성하였다. 데이터 전송속도는 4 Mbps로 설정하였으며 분석 항목으로는 Eye Diagram을 기반으로 한 Total Jitter, Eye Opening, 그리고 차동 신호 간 Skew를 선정하였다 [4].

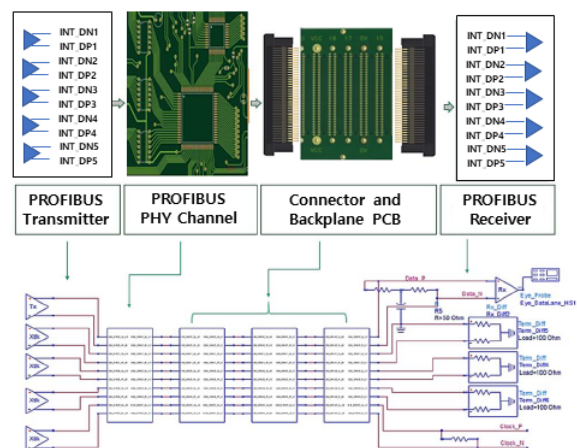


그림 1. PROFIBUS 통신의 시뮬레이션 설정

시뮬레이션 결과, 수신단에서 측정된 Total Jitter는 1.4 ns로 나타났으며 이는 PROFIBUS 통신 규격에서 허용하는 jitter 마진인 50 ns 이하로 확인 되었다. 이는 신호 전송 과정에서 발생하는 랜덤 jitter 및 결정론적 jitter가 수신 샘플링 타이밍에 유의미한 영향을 주지 않음을 의미한다 [5]. Eye Diagram 분석 결과, Eye Height는 3.3V, Eye Width는 248.6 ns로 모의 되었으며, 99.4% UI로 신호의 상승 및 하강 구간에서도 충분한 개구가 확보 되었음을 확인하였다. 이러한 결과는 수신기에서 데이터 판별 시 안정적인

논리 레벨 구분이 가능함을 나타낸다.

또한 차동 신호 간 Skew 분석 결과, 최대 Skew는 약 8.1 ns로 모의 되었으며, 이는 4 Mbps 전송률의 단위구간 대비 약 3.24%에 해당하는 값이다. 따라서 신호 타이밍 측면에서 안정적인 통신이 가능한 수준으로 차동 신호의 위상 불균형이 통신 영향을 미치지 않는 범위로 평가되었다. 특히 MMIS 플랫폼과 같이 다수의 보드 및 커넥터를 포함하는 구조에서도 차동 신호의 시간 정렬이 적절히 유지됨을 확인할 수 있었다. 종합적으로 볼 때, 본 연구에서 수행한 SI 시뮬레이션 결과는 MMIS 플랫폼에 적용된 PROFIBUS 통신이 신호 무결성 측면에서 설계 요구사항을 만족하며, 원전의 환경에서 안정적인 운용이 가능함을 입증한다.

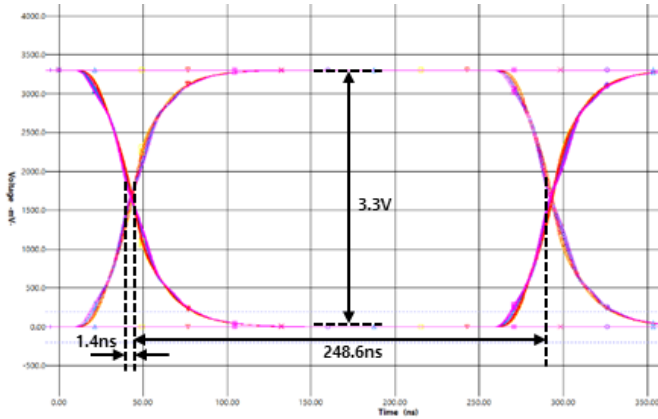


그림 2. Eye Diagram 시뮬레이션 결과

III. 결론

본 논문에서는 MMIS 플랫폼에 적용된 PROFIBUS 통신을 대상으로 신호 무결성 관점의 정량적 분석을 수행하였다. PROFIBUS는 산업 자동화 분야에서 널리 사용되는 통신 방식으로, 차동 신호 기반 구조를 통해 우수한 노이즈 내성을 제공한다. 그러나 다중 보드 및 복잡한 배선 구조를 갖는 환경에서는 물리 계층 요소에 따른 신호 열화 가능성을 사전에 검증할 필요가 있다.

HyperLynx SI 시뮬레이션을 통해 Total Jitter, Eye Opening, Skew 등의 핵심 지표를 분석한 결과, 본 연구 대상 시스템은 PROFIBUS 통신 규격에서 요구하는 신호 무결성 기준을 만족함을 확인하였다. 이는 해당 통신 설계가 산업 환경에서도 안정적인 통신 성능을 제공할 수 있음을 의미한다.

향후 모듈형원자로 MMIS 안전계통 표준 플랫폼 설계 및 제작 시 본 논문에서 제시한 결과를 활용할 예정이다.

ACKNOWLEDGMENT

이 논문은 정부(기후에너지환경부)의 재원으로 혁신형SMR기술 개발사업단의 지원을 받아 수행된 연구임(No.RS-2024-00408005).

참 고 문 헌

- [1] PROFIBUS International, PROFIBUS System Description - Technology and Application, 2020.
- [2] IEC 61158, Industrial communication networks - Fieldbus specifications, IEC, 2019.
- [3] Howard Johnson and Martin Graham, High-Speed Digital Design: A Handbook of Black Magic, Prentice Hall, 1993.

[4] Siemens, HyperLynx Signal Integrity User Guide, Siemens EDA, 2022.

[5] Eric Bogatin, Signal and Power Integrity - Simplified, 3rd ed., Pearson, 2018.