

원전적용을 위한 FPGA 기반 제어기의 정량적 신뢰도 평가

이준구* · 정광일** · 박근옥** · 손광영***

A Quantitative Reliability Analysis of FPGA-based Controller for applying to Nuclear Instrumentation and Control System

Joon-Ku Lee* · Kwang-IL Jeong* · Geun-Ok Park* · Kwang-Young Sohn**

요 약

원자력 산업계는 최근 원전 계측제어계통 설비의 단종과 같은 예상치 못한 환경에 직면해오고 있으며, 이러한 문제를 근본적으로 해결하고자 노력하고 있다. IAEA, IEC, 등의 연구결과에 따르면, FPGA는 단종이 예상되는 제어계통에의 대체수단으로 주목받고 있다. 단종의 영향을 받지 않은 특성을 갖더라도 FPGA가 원자력 플랜트의 PLC (Programmable Logic Controller)를 대체하기 위해서는 높은 신뢰성을 가져야 한다. 따라서, FPGA 기반 제어기의 신뢰성을 향상시키기 위한 소프트웨어 개발 및 MTBF (Mean Time Between Failures)를 포함한 신뢰도분석이 MIL-HDBK-217F에 따라 수행되었다. MTBF는 FPGA 기반 제어기와 COMMON-Q PLC의 신뢰도인 MTBF가 비교분석된다. 신뢰도분석결과 FPGA 기반 제어기는 원전적용 PLC 동등이상의 신뢰성을 나타냄을 확인하였다.

ABSTRACT

Nuclear industries have faced unfavorable circumstances such as an obsolescence of the instrumentation and control system, and therefore nuclear society is striving to resolve this trouble fundamentally. FPGAs are currently highlighted as an alternative means for obsolete control systems. Because of the obsolescence-unaffected characteristics, FPGA should be highly reliable in order to be a replacement for PLC (Programmable Logic Controller). Therefore, it is necessary to establish a software development aspect strategy that enhances the reliability of an FPGA-based controller. The reliability analysis including the MTBF (Mean Time Between Failures) is carried out based on the MIL-HDBK-217F. MTBFs are compared with the FPGA-based controller COMMON-Q PLC. As an analysis result, it shows that the reliability of the FPGA-based controller is better than or equal to that of PLC.

키워드

Field Programmable Gate Array, Programmable Logic Controller, Mean Time Between Failures, Nuclear Power Plant, Instrumentation and Control System

필드 프로그래머블 게이트 어레이, 프로그래머블 논리제어기, 평균고장시간, 원자력 플랜트, 계측제어계통

* 교신저자 : 한국원자력연구원(jklee@kaeri.re.kr)

** 한국원자력연구원(hisunny@kaeri.re.kr, gopark@kaeri.re.kr)

*** ㈜미래엔(kwangyoung.sohn@mirae-en.co.kr)

접수일자 : 2014. 09. 01

심사(수정)일자 : 2014. 09. 25

게재확정일자 : 2014. 10. 17

I. 서 론

1.1 연구배경

산업계 전반에 걸친 디지털 컴퓨터 및 정보처리기술의 급속한 발전에 힘입어 아날로그 기술의 쇠퇴와 함께 디지털 기술로의 대전환이 이루어졌다. 한편, 원자력 플랜트에 사용 중인 아날로그 기반의 계측제어계통은 부품단종 및 기술지원의 어려움으로 인하여 보수 및 교체가 어려운 상황이다. 이러한 문제를 해결하기 위하여 1990년대부터 본격적으로 PLC(Programmable Logic Controller)가 원전 계측제어계통에 적용되었으나, PLC 또한 단종문제로 인한 유지보수의 어려움이 발생하였다. 특히, 아날로그 기기와는 달리 PLC가 소프트웨어에 의해 운영되는 특성은 주요부품 단종시에 운영체제 또는 지원 소프트웨어를 변경해야 하는 상황을 가져왔으며, 이에 따른 인허가 심사가 별도로 요구되었다.

이러한 문제를 극복하기 위하여 설계시점에는 소프트웨어이나, 통합시에는 단일 칩내의 회로로 구성되는 FPGA(Field Programmable Gate Array)에 대한 원자력 산업계의 관심이 집중되고 있다[1-3]. FPGA 기술의 원전 적용 필요성은 다음과 같은 상황에 의해 증대되고 있다.

- 1) 원전 계측제어설비인 아날로그 회로들의 노후화와 이에 따른 지속적인 유지보수의 어려움
- 2) 디지털 기반 PLC의 업그레이드(운영체제 및 지원 소프트웨어 변경)에 요구되는 기술적, 경제적 부담과 규제기관의 인허가 요구
- 3) FPGA 기술의 운영체제 미사용 및 아날로그 회로와 같은 단순한 구성을 갖는 FPGA 기술의 장점

1.2 국내의 연구동향

현재, 국내에서는 FPGA 기술의 원전적용이 미비한 반면, 해외에서는 이미 FPGA 기술을 이용한 제어가 원전에 적용되고 있다. 프랑스(EDF 社)는 이미 노후화된 원전 계측제어설비를 FPGA 제어기로 대체하여 사용하고 있으며, 일본(도시바 社)은 자체 개발한 FPGA 기반 핵계측 감시계통의 인허가를 취득하기 위해 특정기술주제보고서를 미국원전 규제기관(NRC : Nuclear Regulatory Commission)에 제출한 바 있다. 이외에도 캐나다, 미국 등에서 FPGA 기술의 원전적용을 위한 연구가 활발히 진행되고 있으며, FPGA 제어기의 원전적용이 점진적으로 증가하는 상태에 있다[1-2].

1.3 연구 내용

국내의 원자력 계측제어설비로 사용되고 있는 PLC는 원전 안전에 영향을 미치는 안전계통 및 기기를 제어하기 위하여 적용되고 있으며, 비안전계통 및 기기에 도 많이 적용되고 있다. 이러한 원전 안전에 영향을 미치는 PLC를 대체하기 위해서는 높은 신뢰성과 건전성을 가져야 한다. 산업계와는 달리 원자력계에서는 경제성 측면이 아닌 안전성 측면이 중요하므로 FPGA 제어기의 신뢰성 및 건전성 확보가 중요하다[4-5].

FPGA 기반의 제어기 개발시에 하드웨어와 주요 기능을 수행하기 위한 소프트웨어 등의 체계적인 개발이 필요하다. 제어기를 구성하는 하드웨어는 검증된 부품을 사용하고, 신뢰성 높은 설계를 함으로써 그 신뢰성을 향상시킬 수 있다. 또한, 소프트웨어의 경우에는 HPD(HDL-Programmed Devices) 개발수명주기를 적용하여 체계적으로 개발함으로써 소프트웨어의 품질을 향상시킬 수 있으며, 궁극적으로는 제어기의 신뢰성을 향상시키게 된다.

본 논문에서는 개발된 FPGA 기반 제어기에 대한 신뢰도 분석과 타 PLC와의 비교를 통하여 FPGA 기반 제어기에 대한 신뢰성 평가를 수행하였다. 정량적 신뢰도 분석은 MIL-HDBK-217F에 기반한 Part Stress 방법을 적용하였으며, 기존 PLC와 비교하여 동등 또는 그 이상의 신뢰도를 가짐을 확인할 수 있었다.

II. FPGA 기반 제어기

2.1 개발된 FPGA 제어기

FPGA 제어기는 VHDL 사용, 하향식설계, 동시설계적용, 결함유형 제거 및 최적화 기법을 활용하여 개발하였다[1-4]. VHDL는 IEEE Std. 1076에 의해 표준화된 장점이 있으며, 개발시 IP 코어의 사용은 검증자체의 어려움과 원천기술 개발의 필요성으로 인해 사용을 배제하였다.

FPGA 제어기 형상은 그림 1과 같이 FPGA 보드, I/O 보드, 통신보드, 전원모듈, 백플레인 및 세시로 구성된다. 이는 원전 다양성보호계통을 구성하는 최소 모듈이며, 제어기는 아날로그 신호를 입력받아 연산 처리 후 그 결과를 디지털 신호로 출력하는 기능을 갖고 있다. 제어기는 백플레인 버스를 거쳐 서로 통신으로 연결되어 상호 연계한다.

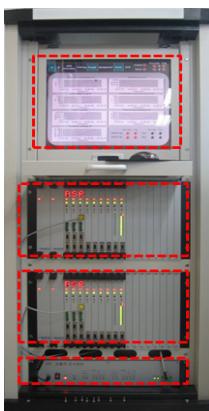


그림 1. 개발된 FPGA 기반 제어기
Fig. 1 Developed FPGA-based controller

2.2 원전 다양성보호계통

원전 다양성보호계통은 정지불능이상과도상태(Anticipated Transient Without Scram) 사건의 완화조건을 충족하도록 설계된다. 또한, 원자로보호계통의 공통유형고장(CMF : Common Mode Failure)에 의한 기능불능시에 다양성보호계통은 원자로정지 및 공학적안전설비를 작동하는 기능을 수행한다. 이러한 이유로 다양성보호계통은 센서부터 최종 구동단까지 원자로보호계통과는 물리적으로 분리 및 전기적으로 격리된다.

현 운용중인 원전의 다양성보호계통은 센서부터 최종 구동단까지 두 채널로 구성되며, 원전변수를 지속적으로 감시하여 2-out-of-2 논리에 의해 자동으로 원자로정지 및 공학적안전설비를 작동시킨다.



Maintenance & Test Panel

FPGA Controller #1

FPGA Controller #2

I/O Simulator

그림 2. 원전 다양성보호계통 시험환경
Fig. 2 System test environment for diverse protection system

개발된 FPGA 제어기에 자동 원자로정지 및 자동 공학적안전설비 작동기능을 수행하는 다양성보호계통

을 그림 2와 같이 두(2) 채널의 FPGA 제어기에 탑재하였다. 또한, I/O 시뮬레이터를 장착하여, 그림 3과 같이 사고시의 시나리오에 따라 공정변수를 생성하여 FPGA 제어기로 구성된 다양성보호계통에 대한 기능 및 성능시험을 수행하였다. 이 시험을 통하여 개발된 다양성보호계통의 정상동작여부를 확인하였으며, 이와 수반하여 FPGA 제어기의 기능수행여부를 확인하였다.

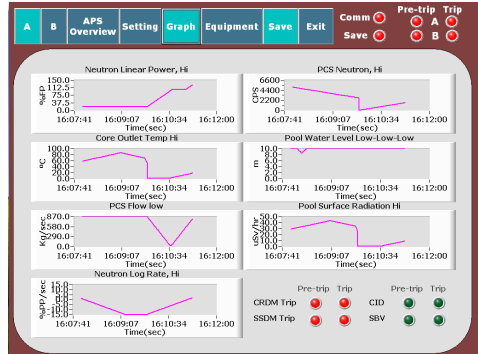


그림 3. 원전 다양성보호계통 시험모드
Fig. 3 Test mode for diverse protection system

III. 신뢰도 분석

3.1 FPGA 제어기 고장률예측

신뢰성 분석 도구인 LAMDA PREDICT 3을 이용하여 FPGA 제어기의 고장률을 예측하였다. 고장률 계산 시, 원자력플랜트에서 FPGA 제어기와 같은 계측제어 설비가 위치하는 장소는 지상에(Ground) 설치되면서, 극한 환경이 아닌 항온 항습이 유지되는 장소로 온화(Benign)한 환경이다. 운전 환경 온도인 30℃를 가정하였다. 환경인자는 크게 육(陸, Ground), 해(海, Naval), 공(空, Airborne) 등으로 분류되며, 여기서 대상이 움직이는 상태인가, 고정된 상태인가, 통제가 가능한 환경 조건인가 등으로 다시 세분되어 총 14개의 운전환경인자가 있다.

FPGA 제어기를 구성하는 FPGA 보드, 통신보드, 아날로그 입출력보드, 디지털 입출력보드 등에 대한 고장률을 계산하였다. 각 보드 별 고장률 예측 값은 표 1과 같다. MIL-HDBK-217F에 의한 예측 값은 다른 예측 모델 및 실제 운전 경험에 의한 값보다 보수적인 값으로 알려져 있다.

표 1. FPGA 기반 제어기와 PLC의 고장률비교
Table 1. Comparison of failure rate between FPGA-based controller and PLC

Board	Failure Rate	
	FPGA-based Controller	Safety PLC
FPGA Board/ Processor Board	2.08×10^{-6}	12.59×10^{-6}
AIB	4.29×10^{-6}	3.51×10^{-6}
AOB	3.52×10^{-6}	7.13×10^{-6}
DIB	1.65×10^{-6}	1.04×10^{-6}
DOB	2.61×10^{-6}	1.39×10^{-6} ¹⁾
		2.21×10^{-6} ²⁾

Note :

- 1) Safety PLC DOM, TTL
- 2) Safety PLC DOM, Relay

3.2 PLC와의 고장률 비교

산업계 적용을 위해 고장에 더욱 강인한 PLC를 개발하기 위한 많은 노력이 있어왔다[6]. 원전적용을 위해 개발된 FPGA 제어기의 신뢰도와 안전급 PLC[7]와의 신뢰도를 표 1과 같이 비교분석하였다. FPGA 보드의 신뢰도는 타 프로세서 보드에 비해 신뢰도가 높은 것을 확인할 수 있으며, 그 외의 보드는 동등한 수준이다. 이는 FPGA로 제작된 보드의 신뢰도가 DSP (Digital Signal Processor) 기반의 보드에 비해 상대적으로 높은 신뢰도를 갖는 것으로 판단할 수 있다.

추가적으로, FPGA 보드의 주요소자 고장률(FPGA 제어기)과 [8]을 기반으로 프로세서 보드의 주요소자 고장률(안전급 PLC)을 그림 4와 같이 비교분석하였다. FPGA 보드와 프로세서 보드는 각각 제어기의 전체 상태를 통제하며, 필요한 프로그램을 내장하여 실행시키는 기능을 수행한다. FPGA 보드 구성소자 중에서 FPGA (XC4VLX25, 2개), 커패시터(100N50K, 136개), 커패시터(100N50K_NC, 37개), 다이오드(SS34, 2개), 커패시터(22U6.3K, 23개) 순으로 고장률이 큰 것으로 확인되었다.

프로세서 보드 구성소자는 SRAM (K6X8016C 3B/TSOP2, 8개), 커패시터(0.1uF-CL_5V, 79개), SRAM(K6R4016C1D, 2개), 마이크로 프로세서(SMQ

320C32, 1개), Flash Memory(Am29F160D/ TSOP, 4개) 순으로 고장률이 큰 것으로 확인되었다.

상기 분석으로 부터 FPGA 보드는 FPGA와 커패시터가 그 보드의 고장률을 결정하는 주요소자인 것으로 확인되었으며, 프로세서 보드의 경우는 메모리, 커패시터가 고장률을 결정하는 주요소자인 것으로 확인되었다. 이러한 결과를 기반으로 프로세서 보드는 운영체제, 지원 소프트웨어 등과 같은 많은 소프트웨어를 운용하는 특성하는 인해 메모리가 많이 필요하며, 이는 보드 고장률을 상승시켰다. 반면에, FPGA 보드는 운영체제 및 지원소프트웨어 등을 사용하지 않는 특성에 의해 메모리가 많이 필요하지 않았다. FPGA 보드로 제어기를 구현할 시에 상대적인 신뢰도를 상승시키는 효과가 있음을 확인하였다.

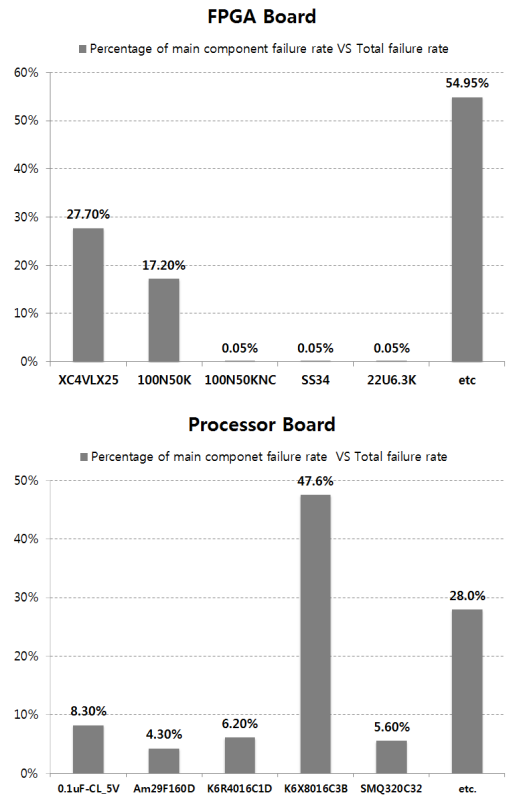


그림 4. FPGA 보드와 프로세서 보드의 고장률
Fig. 4 Failure rate of main components for FPGA and processor boards

IV. 민감도 분석

4.1 FPGA 제어기 민감도분석

FPGA 제어기는 타 PLC에 비해 동등이상의 고장률이 예측되나, 평가결과를 개선하기 위해서는 제어기의 고장률을 최소화하여야 한다. 일반적인 회로설계시에 고장률이 큰 몇 개 부품에 의하여 전체 제어기의 고장률이 증가하는 경향이 있다. 그러므로 제어기의 전체 고장률에 큰 영향을 미치는 부품을 선별하고, 사전에 부품변경에 따른 고장률 개선효과를 정량적으로 평가할 필요가 있다.

본 절에서는 원전의 안전에 직접적인 영향을 주는 FPGA 제어기 부품 중에서 고장률이 높은 부품을 선택하여 고장률 민감도를 분석하였다. 부품의 고장률에 직접적인 영향을 주는 많은 인자들 중에서 외부 온도계수, 품질계수, 사용경력 등은 부품의 선정에 따라 변경될 수 있다.

개발된 각 보드들의 민감도를 분석함으로써 환경온도의 영향이 관련 부품의 고장률 변화에 미치는 영향을 확인하고, 해당 부품을 변경하여 제어기를 더욱 신뢰성 높게 개발할 수 있다.

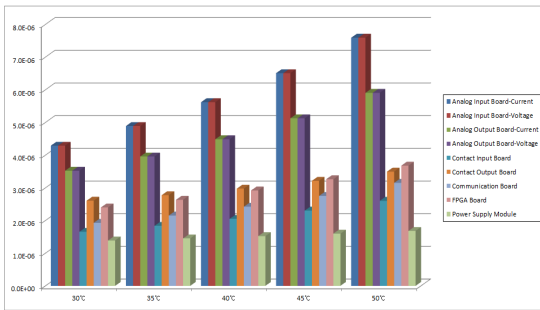


그림 5. 각 보드의 온도 변화에 의한 고장률 변화
Fig. 5 Failure rate variation caused by temperature variation for each board

부품 및 모듈의 사용환경온도는 실제 현장에서 30°C가 가장 적당하나 모듈의 발열 혹은 항온시설의 능력에 따라 실제 사용환경온도는 변할 수 있다. 온도에 따른 고장률 분석은 실제 현장의 사용환경을 고려하여, 30°C에서 50°C까지 5°C 간격으로 분석한다. 이때 MIL-HDBK-217F를 기준으로 부품의 온도 인자(π_T)를 변화시키며 다른 스트레스 요소는 일정하게 유지하

며, 온도 30°C에서 50°C까지 5°C 간격의 고장률의 변화는 그림 5와 같다. 온도변화에 따른 고장률 변화추이는 AIB > AOB > FPGA Board > CMB > CIB > COB 순으로 큰 것으로 확인할 수 있다.

이러한 고장률 변화는 보드내부의 부품의 개수와 종류의 영향이 크므로, 부품의 온도변화 민감도를 파악하여 기술품을 작게할 수 있다. 그림 6은 FPGA 보드를 구성하는 부품의 민감도를 Lambda Predict 3 프로그램을 통해 예측한 그래프이다. 이때 온도의 범위는 0°C에서 100°C를 예측하였다.

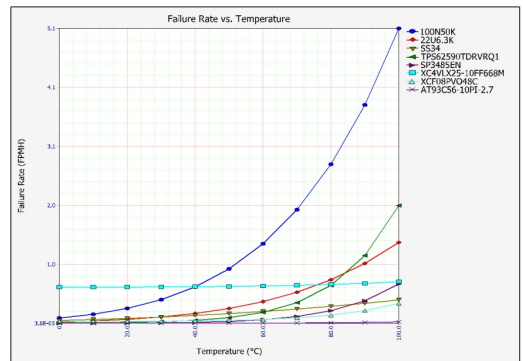


그림 6. 온도변화에 의한 FPGA 보드 부품 고장률변화

Fig. 6 Component failure rate variation caused by temperature variation(FPGA board)

그림 6을 확인하면, 특히 높은 민감도를 가지는 부품은 100N50K Capacitor이다. 이것은 개별적으로는 고장률이 적으나 보드마다 그 수가 적게는 60개에서 많게는 300개가 사용된다. 하지만 환경온도에 대한 민감도 분석에서는 개별적 고장률(부품1개의 고장률)을 따지기 보다는 모든 갯수를 적용하여 분석하는 것이 바람직하다. 이는 신뢰성을 높이기 위해 교체가 필요할 경우 동일한 모든 부품을 교체 또는 변경하는 것이 바람직하기 때문이다.

일반적으로는 신뢰성 높은 제어기를 개발하거나, 제어기의 민감도를 낮추기 위해서는 고장이 적은 신뢰성 높은 부품을 사용하고, 내부의 부품 수를 줄이는 방법을 사용한다.

V. 결론

현재(2013년) 국내에서는 23개의 원전(영광, 울진, 고리, 월성)이 운용 중에 있으며, 2020년까지 9개 원전이 건설 또는 계획 중에 있다. 원전 설계수명 40~60년을 고려할 때, 원전 계측제어설비는 설계수명을 만족하기 위하여 주기적인 유지보수와 설비의 교체가 이루어져야 한다.

FPGA 설비가 원전 계측제어계통에 적용되는 PLC 설비를 대체하기 위해서는 PLC 대비 동등, 또는 그 이상의 신뢰도를 확보해야 하였다. 따라서, PLC와의 신뢰도 비교를 위하여 FPGA 제어기에 대한 고장률 예측이 수행되었다. 예측결과, FPGA 제어기의 고장률은 원전에 적용되고 있는 안전급 PLC와 비교하여 동등 또는 그 이상의 수준으로 확인되었다. 그 원인으로는 PLC가 운영체제 및 지원 소프트웨어를 사용하기 위하여 대용량의 메모리를 필요로 하고, 이는 고장률 상승의 원인이 되었다. 반면에 FPGA는 회로형태의 로직만이 필요하므로 소용량의 메모리만이 필요하였고, 이는 상대적으로 신뢰도가 향상되는 이유를 가져왔다. 본 논문을 통하여 FPGA 제어기가 필연적으로 PLC 제어기에 비해 신뢰도가 높은 이유를 정량적 신뢰도분석을 통해 제시하였다.

높은 신뢰도를 갖는 FPGA 제어기 개발을 통해 해외에 뒤지지 않는 국내기술을 확보할 수 있었으며, 설계 및 분석 내용을 기반으로 원전에 적용되고 있는 PLC를 대체할 수 있을 것으로 판단된다.

감사의 글

이 논문은 2014년도 정부(미래창조과학부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(SMART 안전성 향상을 위한 MMS 연구, No. 2012M2A8A4025979)

References

- [1] J. Lee, "Design and Verification Process for Developing the FPGA-Based Firmware for NPPs," *1st IAEA Workshop on Applications of Field-Programmable Gate Arrays in Nuclear Power*

Plants, Paris, France, Oct. 2008.

- [2] J. Lee, "Design Experience for FPGA-based Bistable module of Reactor Protection System," *4th IAEA Workshop on Applications of Field-Programmable Gate Arrays in Nuclear Power Plants*, Paris, France, Sept. 2011.
- [3] J. Lee and Y. Kim, "Design and Verification of FPGA-Based Applications in Nuclear Power Plants," *J. of Energy and Power Engineering*, vol. 7, no. 3, 2013, pp. 537-544.
- [4] K. Sohn, W. Yi, J. Lee, and I. Koo, "Protection and Control with FPGA," *The 18th Pacific Basin Nuclear Conference (PBNC 2012)*, Busan, Korea, Mar. 2012.
- [5] J. Lee, K. Jeong, G. Park, and K. Sohn, "Design and Qualification of FPGA-based Controller applying HPD Development Life-Cycle for Nuclear Instrumentation and Control System," *J. of the Korea Institute of Electronic Communication Sciences*, vol. 9, no. 6, 2014, pp. 681-687.
- [6] J. Hong, "A Study on Dual System for Fault Tolerance of PLC," *J. of the Korea Institute of Electronic Communication Sciences*, vol. 6, no. 3, 2011, pp. 397-404.
- [7] I. Koo, K. Kim, S. Hong, G. Park, and J. Park, "Digital Asset Analysis Methodology against Cyber Threat to Instrumentation and Control System in Nuclear Power Plants," *J. of the Korea Institute of Electronic Communication Sciences*, vol. 6, no. 6, 2011, pp. 839-847.
- [8] J. Yoo and J. Kim, *Reliability Analysis of PLC Safety System*. Daejeon : KAERI/CM-933, Korea Atomic Energy Research Institute, 2005.

저자 소개



이준구(Joon-Ku LEE)

1998년 충남대학교 전기공학교육과(공학사)
2000년 충남대학교 전기공학과(공학석사)

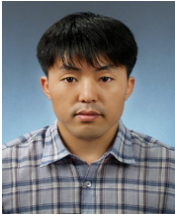
2014년 충남대학교 전기공학과(공학박사)
2000년~현재, 한국원자력연구원 SMART 개발부 선임연구원
2011년~현재, IEC 계측제어전문위원
※ 관심분야 : I&C System, Reliability Analysis



손광영(Kwang-Young Sohn)

1988년도 강원대학교 전산학과 졸업(공학사)
1990년도 홍익대학교 전산학과 졸업(공학석사)

1990년~2002년, 한국원자력연구원, 한국전력기술주식회사(대전)
2003년~2008년, 스마트 설계센터 위촉연구원
2003년~현재, IEC 위원, 계측제어전문위원
2014년 현재, (주)미래엔 대표
※ 관심분야: 디지털 계측제어시스템, CDR (Critical Digital Review), Verification and Validation, Simulator



정광일(Jeong-IL Jeong)

1997년 전북대학교 전자공학과(공학사)
1999년 전북대학교 전자공학과(공학석사)

2003년 전북대학교 전자공학과(공학박사)
2003년~2004년 한국표준과학연구원
2004년~현재 한국원자력연구원 연구로계통설계부 책임연구원
※ 관심분야: I&C System, Cyber Security, Communication System



박근옥(Geun-Ok Park)

1986년 경기공업개방대학 컴퓨터공학과(학사)
1993년 충남대학교 전산학과(석사)
1987년~현재 한국원자력연구원

1987년~현재, 한국원자력연구원 연구로계통설계부 책임연구원
※ 관심분야 : I&C System, Cyber Security, Software V&V