한국형 표준원전의 방사선감시계통 및 공정제어계통 전원공급기 국산화 개발

노재희*, 권영기*, 장동식*, 오치윤*, 이찬호**, 김영국**, 주동식**, 조형민**, 박욱기**
(주)세영엔디씨* , 한국수력원자력(주)**

Development of Power Supplies for Radiation Monitoring System and Process Control System of Korean-type Standard Nuclear Power Plants

J. H. Roh*, Y. G. Kwon*, D. S. Jang*, C. Y. Oh*, C. H. Lee**, Y. K. Kim**, D. S. Ju**, H. M. Cho**, W. G. Park**
Seyeong NDC Co., Ltd*, Korea Hydro & Nuclear Power Co., Ltd**

Abstract - 현재 가동 중인 원자력발전소 계측제어설비의 전원공급기를 살펴보면 인버터 또는 별도의 교류를 입력전원으로 사용한다. 직류 전원공급기들은 설비의 중요도에 따라 이중화로 구성된 설비도 있고 그렇지 않은 기기나 설비도 있다. 이중화로 구성된 전원공급기라 해도 교류 입력전원이 동일하다면 교류 입력이 상실될 때 이중화로 구성된 직류전원도 상실되어 관련계통의 가동이 정지된다. 이러한 문제점을 해결하기 위해서는 각기 다른 교류입력전원으로 동작되는 이중화전원공급기로 구성되는 것이 가장 바람직하다. 본 연구개발의 목적은 두종류의 설비에 소요되는 3종의 직류전원공급기를 원자력 안정성등급으로 국산화하는 연구이다. 기존 제품들은 3종 모두 리니어 방식의 제품이지만, 방사선감시계통 현장제어기의 5V로직 전원공급기와 공정제어계통 전원공급기는 전력변환효율이 높고 소형, 경량화가 가능한 SMPS(Switched Mode Power Supply) 방식으로 개발하였다. 방사선감시계통 현장제어기의 PCA(Printed Circuit Assembly) 저전압공급기는 다양한 종류의 출력전압과 저 전류형이므로 안정성 면에서 동일한 형식의 리니어 방식으로 개발하였으며 3종류 모두 출력용량을 20% 이상 향상시켰다. 또한, 논문을 통해 SMPS 방식의 전원공급기의 핵심 부품인 Control Module을 Hybrid IC형으로 자체 설계하여 성능이 우수한 제품을 지속적으로 생산할 수 있는 기틀을 마련하고자 한다.

1. 서 론

본 연구개발은 2종류의 설비에 소요되는 3종의 전원공급기를 원자력 안정성등급(Q)으로 국산화하는 연구이며 재안부서인 영광원자력 제2계측제어부에서 현재까지 운영결과 노출된 문제점 개선과 설비의 안정적 운영을 목적으로 시행하게 되었으며 그 핵심적인 내용은 다음과 같다. 첫째, 공정제어계통(Foxboro Micro Spec 200 기종) 전원공급기는 현재 단일형 전원공급기가 설치되어 있어 전원공급기 자체 고장이나 교류입력전원용 인버터 고장 시 공정제어 기능상실로 관련 계통 운전기능이 정지하게 설계되어 있다. 이에 따라 인버터 고장이나 전원공급기 고장으로 인한 계통정지를 방지하려면 각기 다른 인버터 입력전원과 이중화된 전원공급기가 필요하나 이러한 제품은 원 제작사에도 없고 세계적으로 유통되는 제품이 없으므로 국산화 개발이 요청되었다. 국산화 개발을 통해 인버터 고장이나 전원공급기 고장으로 인한 원자력발전소 계통정지를 방지할 수 있어 발전소 안전운전에 크게 기여할 수 있게 되었다. 둘째, 소내 방사선감시설비 현장제어기 캐비닛(LCU) 내부에 장치된 전원공급기의 방열기온도(약 46℃)가 너무 높아 전자회로기판 및 부품에 영향을 미쳐 오동작 및 수명단축을 초래하였으며 단종부품이 많아 유지보수가 어렵고 기기 공급사가 여러 차례 변경되어 예비품 구매에 많은 애로사항이 있다. 이를 개선하기 위해 국산화 개발을 통해 캐비닛 내부온도를 30℃ 이하로 유지시키고 예비품의 원활한 확보가 가능토록 하였다.

2. 본 론

2.1 연구개발의 최종목표

2.1.1 개발범위

1. 개발제품의 명칭
   가. 공정제어계통 전원공급기
   나. 방사선감시계통 전원공급기
      - 5V 로직 전원공급기
      - PCA 저전압공급기
2. 용도
   가. 원자력 및 수화력발전소 공정제어계통 전원공급기 대체와 이중화 전원으로 이용
   나. 원자력발전소 방사선감시계통 현장제어기 전원공급기 대체
   다. 일반산업체설비의 제어계통 전원공급기 대체
3. 개발내용
   가. 기존제품 성능분석 검토 및 개발 시작품의 Layout 결정
   나. 목표성능 및 디자인 등 현장과 협의 결정
   다. 시작품 설계제작
   라. 성능평가 및 수정보완
   마. 기기검증
   바. 현장적용시험

2.1.2 목표성능 및 특성

기존제품과 최종 개발제품의 성능 및 특성비교는 <표 1>과 같다.

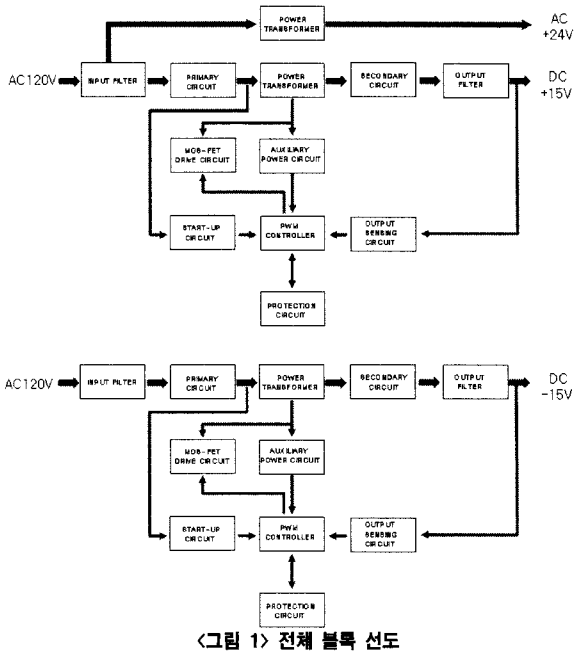
<표 1> 기존제품과 개발제품의 성능 및 특성비교

제품명	항 목	기 존 제 품	개 발 제 품	비 고
공정제어계통	제어방식	Linear	SMPS	고급설계
	출력/오차	±15V5A ±5%	±15V6A ±5%	20%증가
	Ripple & Noise	Ripple 150mV P-Pv Max	50mV/150mV P-Pv Max	감소
	출력 Mode	단 일	이중화	2대 1조
	중 량	24.0kg	26.7kg	내진해석
5V 로직	제어방식	Linear	SMPS	
	출력/오차	5V4A ±5%	5V6A ±5%	50%증가
	Ripple & Noise	N/A	50mV/150mV Max	
	중 량	4.5kg	1.44kg	
PCA 저전압	제어방식	Linear	Linear	
	24VIS 출력용량	14W	18W	20%증가
	오 차	N/A	Reg ±5%	
	맥류진폭	N/A	Unreg 2%Max Reg 1%Max	
	24V 전압가변	N/A	가 변	
	측정단자/표시램프	N/A	설 치	
	중 량	0.74kg	1.14kg	

2.2 연구개발 내용

2.2.1 공정제어계통 전원공급기

1. 전체 블록 선도



<그림 1> 전체 블록 선도

2. SMPS 설계방식 선정
   가. Forward Converter 방식으로 선정

Forward 방식은 출력 용량이 500W급 정도까지의 중 전력용으로 많이 응

용 되고 있다. Buck Converter 방식과 기본 동작이 동일하며, 안정성이 뛰어난 특징을 가지고 있으며 신뢰성이 높다. 출력 평활 커패시터에 의한 손실 및 노이즈를 최소화하기 위해서 선정하게 되었다.

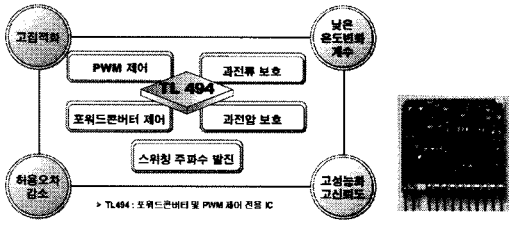
3. SMPS 회로설계 및 부품선정

가. PWM Controller 선정 및 스위칭 주파수 설계

SMPS에서의 PWM(Pulse Width Modulation) Controller의 선정은 매우 요하다. 설계하고자 하는 방식을 지원하는지와 전압, 전류 제한 및 Duty 폭의 사용 여부와 운용 전압범위 또한 중요하다. 본 설계에 사용할 PWM 제어 전용 IC는 Hybrid IC인 TL494(TI)를 사용하여 설계에 적용하였다.

나. 핵심부품 Hybrid IC

적용된 Hybrid IC의 설계구성과 PCB 사진을 <그림 2>에 나타내었다.



<그림 2> Hybrid IC 설계구성 및 PCB

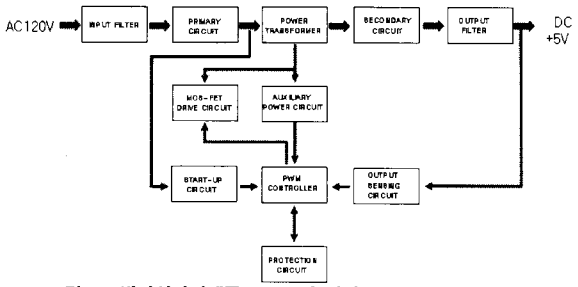
4. 시작품 제작

본래 연구개발 목표는 기존제품의 동일 체적 내에 출력용량을 2배 증가시키는 것 이었으나 현장 실무회의 시 기존제품의 동일 체적 내에 2대의 전원공급기가 장치될 수 있도록 개발목표가 수정되어 협소한 공간을 효율적으로 활용하기 위해 기능별로 4개의 PCB를 설계 제작하여 개별시험을 통해 단위부품들의 정수를 결정하였으며 전자파 시험 및 온습도 변화시험을 대비, 인덕터 등의 부품은 취부 여유공간을 계산하여 1차, 2차 시작품 PCB를 설계, 제작하였다. 방열판은 MOS FET 스위칭 손실과 다이오드 손실을 감안 방열판 체적계산을 한 후 내부방열판은 밀링가공하고 외부방열판은 압출금형을 제작하여 가공하였다. 시작품 시연 및 평가회를 시행하였고 개선요구사항을 반영하여 완성된 최종 시작품을 <그림 3>에 나타내었다.

<그림 3> 공정제어계통 전원공급기 최종 시작품

2.2.2 방사선감시계통 전원공급기

1. 5V 로직 전원공급기 전체 블록 선도



<그림 4> 방사선감시계통 5V 로직 전원공급기 전체 블록 선도

2. 5V 로직 전운공급기 설계방식 선정

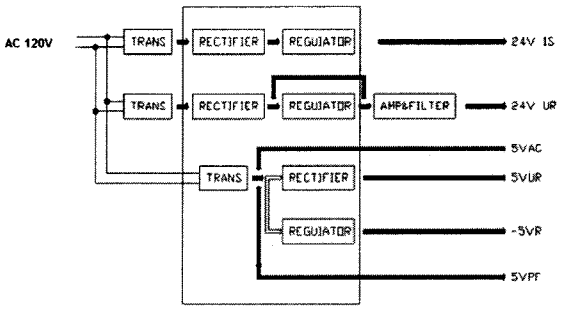
방사선감시계통 5V 로직 전원공급기는 앞에서 설명한 공정제어계통 전원공급기에서 설명 하였듯이 안정성이 뛰어난 특징을 가진 Forward Converter 방식으로 선정하였고, PWM Controller도 동일하게 같은 Hybrid IC를 적용하여 설계하였다.

3. 5V 로직 전원공급기 시작품 제작

연구개발의 중간평가 및 실무협의 과정을 통해 도출된 문제점들을 수정 보완하여 제작한 최종 시작품을 <그림 5>에 나타내었다.

<그림 5> 방사선감시계통 5V 로직 전원공급기 최종 시작품

4. PCA 저전압공급기 전체 블록 선도



<그림 6> 방사선감시계통 PCA 저전압공급기 전체 블록 선도

5. PCA 저전압공급기 설계방식 선정

방사선감시계통 PCA(Printed Circuit Assembly) 저전원공급기는 7종의 DC출력과 1종의 AC출력을 방사선감시계통의 전자회로카드모듈인 CPU Board, A/D Board, I/O Board, Power Isolation Board, Preamplifer Board, Log Pico-amp Board 등과 고전압 공급기 및 체크소스 전원을 공급하는 저전류형 전원공급기이다. 제어방식은 SMPS 타입으로 구현하려면 기존제품의 체적 내에 전체부품을 수용할 수 없기 때문에 기존 방식과 같이 리니어 타입으로 개발하고 24V IS 전압의 용량 증대와 장수명 콘덴서 채택, 점검 및 정비 편의성을 제고하도록 기능 및 성능을 개선하였다.

6. PCA 저전원공급기 시작품 제작

연구개발과정에서 실무자 회의 시, 1차 시작품에 대한 평가 및 토의를 한 결과 순시점검과 주기점검절차 수행 시 편의성을 제고하기 위해 몇가지 수정사항이 발생하였고 이를 보완하여 최종 제작된 시작품을 <그림 7>에 나타내었다.

<그림 7> 방사선감시계통 PCA 저전원공급기 최종 시작품

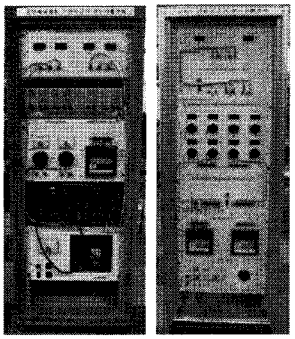
2.3 연구개발 시험 및 평가

2.3.1 성능시험 평가 기준

공정제어계통 및 방사선감시계통 전원공급기 성능능평가 기준은 현장실무자 회의 시 기존제품보다 성능을 향상시키기로하고 구체적으로 합의한 내용으로 연구개발 최종목표에 적합한 성능평가를 수행하였다.

2.3.2 성능시험

성능평가를 위해 성능시험 장치를 별도로 제작하여 다양한 성능을 평가할 수 있게 하였으며 이 장치들을 이용하여 성능시험을 시행하였고 장치들의 실물은 <그림 8>과 같다.



<그림 8> 공정제어계통 및 방사선감시계통 전원공급기 성능시험장치

2.3.3 내환경검증 및 내진검증

원자력발전설비는 정상적인 환경 환경조건 뿐만 아니라 지진, 홍수, 화재 등의 천재지변이나 고온, 고압, 고방사선, 화학약품살수 등을 수반하는 원자로냉각재 상실사고(LOCA; Loss-Of-Coolant Accident), 주증기배관파단사고(MSLB ; Main Steam Line Break), 고에너지배관파단사고(HELB ; High Energy Line Break) 등과 같은 최악의 사고조건 하에서도 정상적인 성능과 안전성을 유지할 수 있어야 한다. 이러한 정상운전, 비정상운전 및 사고환경조건 하에서 원자력발전설비의 성능과 안전성 유지여부를 확인 및 입증하는 것이 기기검증이다. 기기검증기술은 기본적으로 원자력발전설비의 내열성, 내방사선, 내습성, 내압성, 운전수명, 전자파내성 등을 확인하는 "내환경검증(Environmental Qualification)", 지진이나 진동에 대한 내구성을 입증하는 "내진검증(Seismic Qualification)", 그리고 냉각재상실이나 배관파단

등의 설계기준사고(Design Basis Accident) 하에서의 정상적인 기능 및 성능 유지여부를 입증하는 "사고검증(Accident Qualification)을 포함한다. <표 2>에 내환경검증 및 내진검증에 대한 내용을 요약하여 나타내었고, <표 3>에 시험항목별 시험순서를 나타내었다.

<표 2> 인증시험 및 내진검증 내용

시험 내용	내환경검증 (Environmental Qualification)	내진검증 (Seismic Qualification)	사고검증 (Accident Qualification)
시험 항목	· 온도, 습도, 압력 · 방사선 · 운전수명 · 전자파내성 · 기타 특수환경 조건	· 비지진 진동 · 지 진	· LOCA · MSLB · HELB

<표 3> 시험순서

시험항목	공정제어계통 P/S	5V 로직 P/S	PCA 저전압 P/S
EMC Test	○	○	○
↓			
Radiation Aging Test	N/A	○	○
↓			
Thermal Aging Test	○	○	○
↓			
Vibration Aging Test	○	○	○
↓			
Seismic Qualification Test	○	○	○
↓			
Test Report	○	○	○

2.3.4 현장적용시험

현장적용시험은 인증시험 종료 후 신뢰성을 입증하기위해 현장부서 내부지침에 의거 1,000시간 이상을 수행하였다. 먼저 현장설비에 적용하기 전, 정비실에서 공장시험에 준하는 성능시험을 시행한 결과 만족한 결과를 얻었으며 해당설비에 설치하여 적용시험을 수행하였고 그 결과를 도출하였다. <그림 9>에 공정제어계통 및 방사선감시계통 전원공급기 현장설치사진과 <표 4>에 현장성능시험 결과를 나타내었다.

(a) 공정제어계통 전원공급기

(b) 방사선감시계통 전원공급기

<그림 8> 공정제어계통 및 방사선감시계통 전원공급기 현장성능시험

<표 4> 현장성능시험 결과

항 목		기 준	결 과
공정제어	+15V 출력	±0.75V	±0.1V
	-15V 출력	±0.75V	±0.1V
	부하변동율	최대 6.6%	최대 2.34%
	맥류진폭	최대 50mV	최대 32mV
5V 로직	+5V 출력	±0.25V	± 0.02V
	부하변동율	최대 6.6%	최대 0.67%
	맥류진폭	최대 50mV	최대 10mV
PCA	24V IS	±2.0V	±0.029V
	24V UR	±2.0V	±0.041V
	-5V R	±0.25V	±0.011V

구 분	공정제어계통	RMS 계통
장 소	영광원자력 제2발전소 Radwaste 빌딩	영광원자력 제2발전소 3호기 TSC HVAC 출입공기 감시기
기 간	'08.2.19~4.2 (44일간)	'08.2.13~4.2 (50일간)
결 과	만 족	만 족

3. 결 론

본 연구개발을 수행 하면서 거둔 주요성과는 다음과 같이 요약할 수 있다. 첫째, 방사선감시계통 현장제어기 함체 내의 온도를 현저히 저감시켰고 부품단종으로 인해 수리가 불가능하였던 문제를 해소하였다. 또한 공정제어계통은 단일 Bay별로 전원 이중화를 실현하여 인버터 고장이나 전원공급기 자체 고장으로 인한 제어설비 고장과 관련계통의 불시 정지를 예방하여 원자력발전소 설비의 안전운전에 크게 기여하게 되었으며, 현재까지 전량 수입에 의존하던 제품군의 국산화에 성공함으로써 저렴한 비용으로 신속한 조달이 가능하여 발전원가 절감에 기여 할 수 있다. 둘째, 국내에도 SMPS 방식의 전원공급기 생산업체가 다수 있으나 원자력발전소 안전성등급 업체는 소수인 실정이며 세계적으로도 Lamda 등 10여개 회사가 시장을 지배하고 있는 시점에 안전성등급 국산화에 성공하였음은 매우 고무적이다. 마케팅 측면에서 국내원자력발전소, 수화력발전소 및 일반산업체 등 국내 시장 수요가 많고 세계시장 진출도 가능하여 국내외 전시회 출품 등을 통해 판로 개척 노력을 경주 한다면 개별기업의 매출확대에 획기적으로 기여할 것이다. 또한 연구개발 수행결과, 요소기술과 기반기술 확보로 향후 개발이 필요한 유사제품군 개발의 기반을 구축하였다. 셋째, 3종류의 전원공급기를 원자력 안전성등급으로 동시에 개발하면서 많은 시행착오가 있었음에도 불구하고 관련 부서 간 유기적인 협조체제를 구축하였으며 여러 차례의 중간평가를 통해 지적 및 권고사항들을 충실히 이행하고 현장실무부서의 적극적인 참여와 협조를 통해 현장성능시험 결과가 만족할만한 성과를 이룰 수 있었다고 생각된다.

[참 고 문 헌]

[1] Instrument Power Supply Tech Note : NMAC Tech Note(EPRI Licensed Manual)

[2] Ionel Dan Jitaru, "High Frequency, Soft Transitions Converter," Conf. Proc. APEC'93, pp.880-887

[3] Ionel Dan Jitaru, and George Cocina, "High Efficiency DC-DC Converter," Conf. Proc. APEC'94, pp.638-644.

[4] Sergey Korotkov, Valery Meleshin, Rais Miftahutdinov, Simon Fraidlin, "Soft-Switched Asymmetrical Half-Bridge DC/DC Converter : Steady-State Analysis. An Analysis of Switching Processes," Conf. Proc. TELESCON'97, pp.177-184.

[5] I. Cohen, D. Hills, N. Y., "Pulse Width Modulated DC/DC Converter with Reduced Ripple Current Stress and Zero Voltage Switching Capability," U.S. Patent 5,291,382.

[6] Rais Miftakhutdinv, Alexey Nemchinov, Valery Meleshin, Simon Fraidlin "Modified Asymmetrical ZVS Half-Bridge DC-DC Converter," Conf. Proc. APEC'99, pp.567-574.

[7] Y. Xi, P. K. Jain, G. Joos, and H. Jin, "A Zero Voltage Switching Forward Converter Topology," Conf. Proc. INTELEC'97, pp.116-123.

[8] Y. Xi, P. Jain, Y. Liu, and R. Orr, "A Zero Voltage Switching and Self-Reset Forward Converter Topology," Conf. Proc. APEC'92, pp.827-833.

[9] Leonid Krupskiy, Valery Meleshin, Alexey Nemchinov, "Unified Model of the Asymmetrical Half-Bridge Converter for Three Important Topological Variations," Conf. Proc. INTELEC'99, pp.

[10] Laszlo Huber, and Milan M. Jovanovic, "Forward Converter with Current Doubler Rectifier : Analysis, Design, and Evaluation Results," Conf. Proc. APEC'97, pp.605-611.

[12] Paul Imbertson, and Ned Mohan, "Asymmetrical Duty Cycle Permits Zero Switching Loss in PWM Circuits with No Conduction Loss Penalty," IEEE Trans. Ind. Appl. Vol. 29, No. 1, pp.121-125, Jan/Feb, 1993.

[13] Jose A. Cadena-Hernandez, Burke Henehan, Lee Myers, "IEEE 1394 EMI Board Design and Layout Guidelines", Application Report, Texas Instruments, July, 2002

[14]"DC to DC Converter Noise Reduction, Application Bulletin, Burr-Brown Corp., March, 1994