

# 강압형 병렬 컨버터의 제어기 설계 및 검증

(Design and Measurement of Controller for Paralleling Step-down Converter)

박성우\* · 윤희광\*\* · 박희성\* · 장진백\* · 이상곤\*

(Sung-Woo Park · Hee-Kwang Yoon · Hee-Sung Park · Jin-Beak Jang · Sang-Kon Lee)

한국 항공우주 연구원\* · 한국항공우주산업\*\*

## Abstract

Optimized controller design for converters are very important because control-loop characteristics of converters determine the dynamic performances of converters. In addition, verification process of the control-loop characteristics by simulation and measurement with real hardware is sure to be performed after all parameters for controller and main power-stage are fixed. In this paper, general process for designing outer-loop controller of paralleling step-down converter is described. Simulation results are also contained for verifying validity of controller design results. Finally, voltage control-loop measurement method is explained and results are compared with simulation outputs.

## 1. 서론

다양한 부하 조건 및 동특성을 요구하는 시스템의 요구 사항 증가로 안정된 출력 특성을 요구하는 단계를 넘어 최적화된 제어 회로의 설계에 대한 요구가 점차 증가하고 있다. 뿐만 아니라 근래 들어 시스템 신뢰성의 증가, 교체 및 수리의 편의성 증대, 개발 및 유지 보수 비용 개선 등의 잇점으로 병렬형 컨버터에 대한 응용이 점차 증가하고 있다. 하지만 병렬형 컨버터의 제어회로 설계는 일부 모듈 고장에 대한 안정성 영향등을 포함하여 단일 모듈의 경우보다 더욱 많은 조건을 고려하여 이루어 져야한다. 그리고 설계된 제어회로를 적용한 컨버터 시스템의 안정성 및 동특성을 실제 하드웨어 레벨에서 검증하기 위해서는 반드시 최종 컨버터 시스템 레벨에서 제어루프의 이득등을 포함한 제어기 특성에 대한 측정 작업이 수행되어야 한다.

본 논문에서는 4 병렬 강압형 컨버터의 외부 전압 제어회로의 설계, 모의실험 및 측정에 대한 과정 및 검토에 대한 과정을 설명하고, 실제 컨버터 개발에 적용 가능한 방향을 제시한다. 병렬 컨버터의 제어 루프 특성 측정은 HP4194A Gain-phase Analyzer를 통하여 수행되었으며, 4 병렬 컨버터 및 단일 모듈 고장의 경우에 대해서 모두 수행 되었다.

## 2. 본론

### 2.1. 측정대상

표 1은 본 논문에서 적용된 4 병렬 컨버터의 전기적 사양을 정리한 것이다. 각 컨버터의 전원단은 제로 리플 강압형 컨버터를 사용하였으며, 단일 컨버터의 전력정격은 400W로 설계 되었다.

표 1. 4병렬 강압형 컨버터의 전기적 사양  
Table 1. Design parameters for 4-parallel step-down dc/dc converters

Design Parameter	Specifications
Power-stage type	Advanced Buck type
PWM control strategy	Hardware control
No. of converter module	4 converters module
Power capability[W]	400W/converter
Input voltage range[V]	30.0A - 48.6A
Output voltage[V]	27.5A - 28.5A
Output current[A]	15A current limit
Ripple on output voltage[mV]	200mV
Converter efficiency[%]	>95%(@36-48.6V)
Redundancy concept	3 of 4 redundancy
Switching frequency[Khz]	110
No. of Board	2 boards

그림 1은 4-병렬 컨버터의 블록 다이어그램을 나타낸다. 4 병렬 컨버터는 모듈 간 전류 분배를 위해 개별 컨버터 내부에 독립된 전류 제어기 (Current controller)를 포함하며, 출력 전압 제어를 위해 전체 컨버터들이 공유하는 전압 제어기 (Voltage controller)를 포함한다. 전류 제어를 위해서는 전원 단 출력 전류와 동일한 값을 갖는 전원 단 내부의 인덕터 전류의 합으로 얻어진 전류 값을 사용하고 있다.

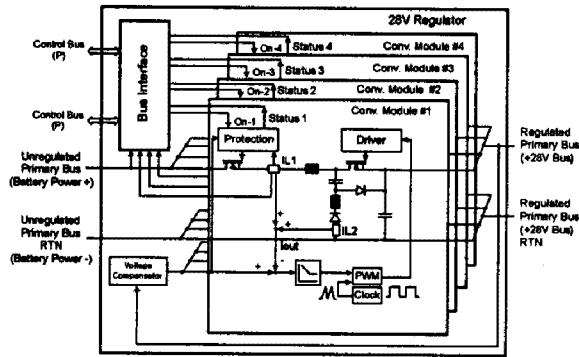


그림 1. 4병렬 강압형 컨버터의 블록다이어그램  
Fig. 1. Block diagram of 4-parallel step down dc/dc converter

## 2.2. 제어회로 설계

병렬 컨버터의 외부 전압 제어회로는 아래 그림 2와 같은 2-pole, 1-zero를 갖는 제어기를 적용하여 구성되었다. 본 논문에서 적용된 전원단 동작특성으로 인해 제어 회로의 에러 신호는 일반적인 컨버터 전압 제어기와는 달리 비 반전 특성을 갖도록 설계 되어야 하나 하드웨어 구성 시, 노이즈 특성 개선을 위하여 메인 제어기를 반전 입력 단으로 에러 신호를 인가하고 이후 단순 이득 값을 갖는 반전 증폭 단을 추가하는 방법을 적용하였다.

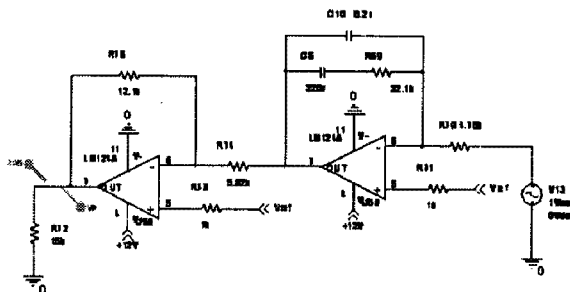


그림 2 외부 전압 제어기의 구조  
Fig. 2. Configuration of outer-loop controller

$$F_{p1} = \text{Origin}$$

$$F_z = \frac{1}{2 \times \pi \times R69 \times C6} = 32.7\text{Hz}$$

$$F_{p2} = \frac{1}{2 \times \pi \times R69 \times C10} = 878.2\text{Hz}$$

설계된 제어기의 pole, zero 주파수는 전원단의 스위칭 주파수, 병렬 컨버터의 수 및 모듈 고장 시의 컨버터 특성 등을 고려하여  $f_z = 32.7\text{Hz}$ ,  $f_{pole} = 878.2\text{Hz}$ 로 설계 되었다. 아래 그림3에 외부 전압제어의 주파수 특성을 나타내었다.

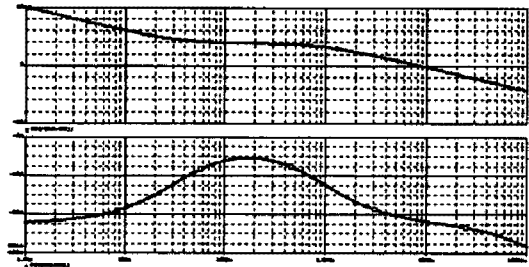


그림 3 외부 전압 제어기의 주파수 특성  
Fig. 3. Frequency characteristics of outer voltage-loop controller

## 2.3. 모의실험

그림 3과 같은 주파수 특성을 갖는 제어기를 적용한 4-병렬 컨버터 전체 시스템의 주파수 특성은 그림 4와 같은 구성을 통해서 수행된다. 각 개별 컨버터의 전원단으로 구성된 4 개의 컨버터는 독립된 내부 전류 감지 회로 및 전류제어기를 포함하며, 전체 병렬 컨버터의 외부에 그림 2와 같은 구조를 갖는 전압 제어기를 추가하여 모든 병렬 컨버터들이 동일한 전압 제어 신호로 동작하도록 구성된다.

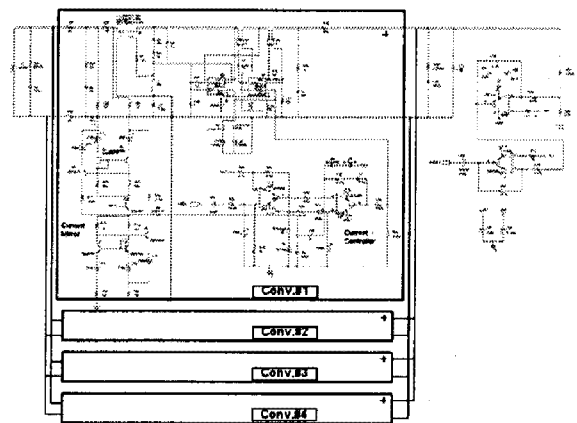


그림 4. 4-병렬 컨버터의 모의실험 회로  
Fig. 4. Schematics for simulation of 4-parallel converter system

그림 4와 같이 구성된 모의실험 회로를 구성을 이용하여 다양한 입력 전압, 출력 전력 조건에서 병렬 컨버터 시스템의 외부 전압 제어 루프의 주파수 특성을 검증한다. 뿐만 아니라 서론에서 언급되었듯이 병렬 컨버터의 제어기 설계에서 반드시 고려되어야 하는 특정 모듈 고장에 대한 컨버터 제어기의 주파수 특성 변화도

같이 검증한다. 그림 5는 4-병렬 조건, 최소 입력 전압 및 최소 부하 조건에서 수행한 외부 전압 제어루프 특성의 모의실험 결과를 나타내며, 충분한 위상 및 이득 마진이 있음을 확인 할 수 있다.

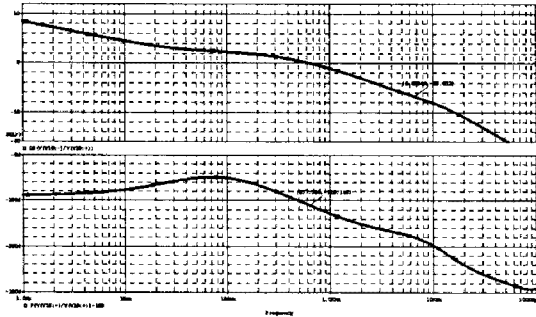


그림 5. 4 병렬 컨버터의 전압 제어루프 특성  
Fig. 5. Frequency characteristics of 4 paralleled converters(Outer voltage-loop controller)

### 2.4. 측정방법

모의실험을 통해서 설계 화정된 제어회로를 적용한 컨버터 시스템의 제어기 특성은 최종적으로 메인 전원 단에 적용되고, 실험적으로 측정의 검증 단계를 수행하여 마지막으로 확정되어야 한다. 그림 6은 일반적인 컨버터 시스템의 루프 이득에 대한 개념도를 나타낸다. 컨버터의 루프 이득 특성은 컨버터 전원 단, 제어기 및 PWM 블록의 모든 특성을 포함한다.

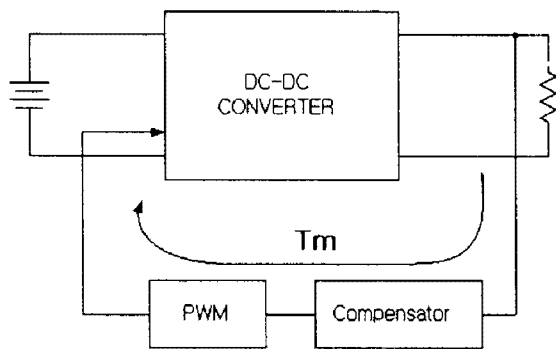


그림 6. 컨버터의 루프이득 정의  
Fig. 6. Loop-gain of the dc/dc converter

그림 6과 같이 정의된 컨버터의 루프이득 측정은 그림 7과 같은 구성으로 가능하다. 컨버터의 제어루프 특성 측정은 실제 컨버터가 동작하고 있는 상태에서 수행되어야 하며, 컨버터 출력 단에는 일반적으로 높은 전압이 인가되어 있거나 큰 부하 전류가 출력될 수 있으므로 측정 장비를 직접적으로 컨버터 시스템에 결선하여 측정할 수는 없다. 따라서 그림 7과 같이 컨버터의 제어 루프를 구성하는 폐 루프에 1:1 트랜스포머로 절연하고 전원단과 직접적으로 결선되지 않는 1차 측에 측정을 위한 기준 신호를 인가함으로써 컨버터가 동작

하는 상태에서 컨버터의 제어 루프 특성을 측정할 수 있다. 그림 7에서 컨버터의 제어 루프 이득은 다음과 같이 정의 될 수 있다.

$$\text{Loop-gain } (T_m) = V_x/V_r$$

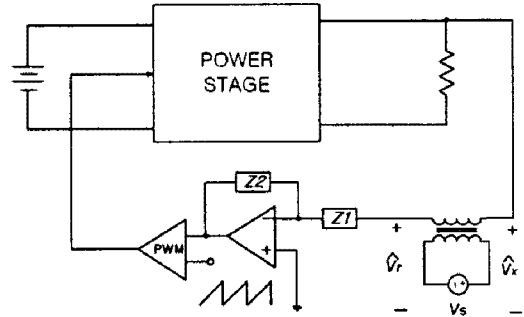


그림 7. 컨버터의 루프이득 측정 개념도  
Fig. 7. Conceptual diagram for measuring loop-gain of converter system

그림 8은 4-병렬 컨버터의 전압제어 루프 특성을 측정하기 위한 실제 하드웨어 및 장비의 구성도를 나타낸다. 병렬 컨버터는 측정하고자 하는 동작 조건에 맞는 입력 전압 및 부하 전력조건을 설정하여 동작시키고, 측정 장비를 이용하여 시험을 위한 기준 신호를 인가하고, 해당 신호가 궤환 루프를 통해서 나타나는 신호를 장비로 입력 받음으로서 컨버터 시스템의 폐 루프 이득 특성을 측정할 수 있다.

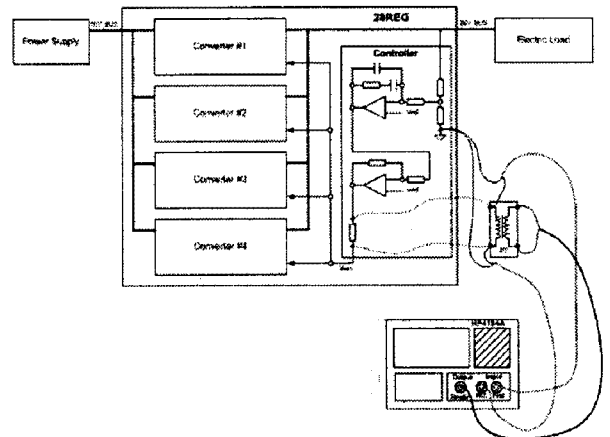


그림 8. 병렬 컨버터의 전압 루프이득 측정  
Fig. 8. Outer voltage-loop-gain measurement of paralleled converter

실제 하드웨어를 이용하여 폐 루프 이득 특성을 측정할 때, 폐 루프의 어느 부분에 측정 기준 신호를 인가하느냐에 따라서 측정 결과에 많은 노이즈가 유기 될 수 있으며, 측정 장비에서 인가하는 기준 신호의 크기도 측정하고자 하는 컨버터 시스템의 전압 및 전류 레벨에 따라서 적절하게 선택 및 조정되어야 한다. 적절하지 않은 기준 신호를 인가하는 것은 컨버터 시스템의 오동

작을 유발 할 수 있으며, 잘못된 측정 결과를 유발 할 수 있으므로 최소 10mV이하의 작은 값에서부터 컨버터가 안정적으로 동작하는 값까지 순차적으로 증가시키면서 측정을 수행하여야 한다. 그림 9는 실제 루프 이득 측정에서 기준 신호를 인가한 부분을 나타낸다.

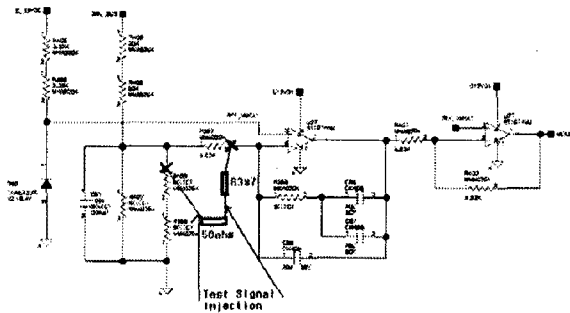


그림 9. 측정 기준 신호 인가  
Fig. 9. Breaking point for applying test signal

### 2.5. 측정결과

그림 10은 4-병렬 컨버터의 외부 전압 제어루프의 주파수 특성을 나타내며, 그림 11은 1개 모듈 고장 시(3-병렬 컨버터)의 전압 제어루프 특성을 나타낸다. 각 경우에 대해서 모두 충분한 위상 및 이득 마진이 있음을 확인 할 수 있다. 100Hz 이하의 저주파 영역에서는 측정을 위한 트랜스포머의 주파수 특성 영향으로 측정되지 않았다.

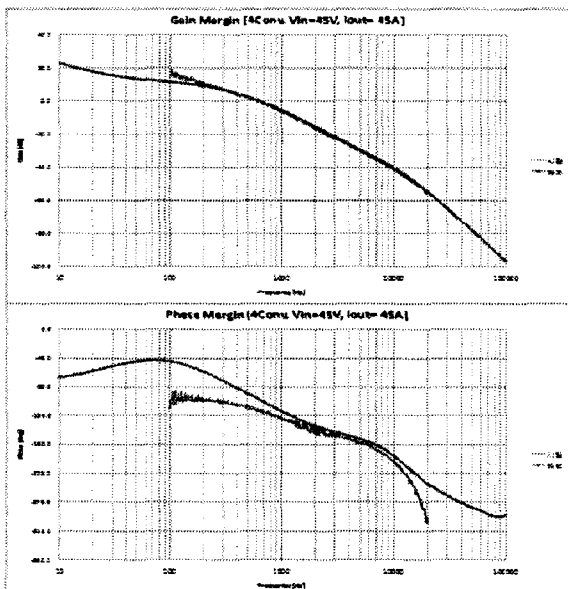


그림 10. 4-병렬 컨버터의 전압 제어루프 특성  
Fig. 10. Outer voltage-loop characteristics of 4-parallel converter

제어루프의 이득 특성은 단위 이득 주파수 값 등의 특성이 모의실험 결과와 매우 잘 일치함을 확인 할 수 있다. 하지만 위상 특성은 측정과정에서 이득 특성보다 민감하여 저주파 및 고주파 영역으로 갈수록 이득값과 다소 차이를 나타내는 것으로 판단된다.

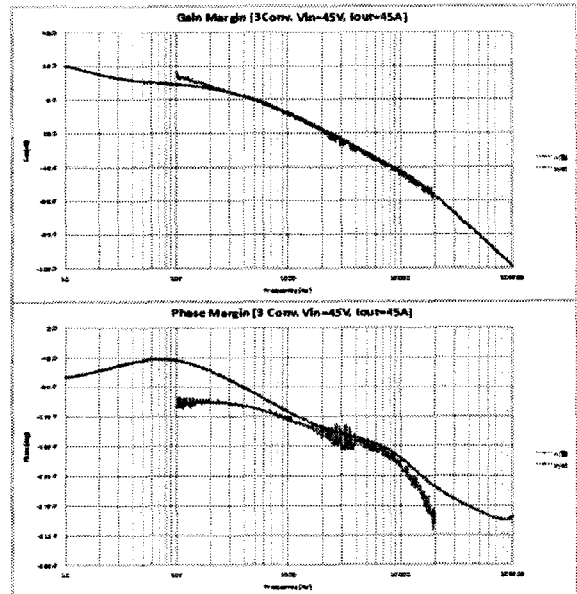


그림 11. 3-병렬 컨버터의 전압 제어루프 특성  
Fig. 11. Outer voltage-loop characteristics of 3-parallel converter

### 3. 결론

표 2에 4-병렬, 3-병렬의 경우에 대해서 다양한 입력 전압, 출력 전압 및 부하 전력 조건에서의 위상 및 이득 마진의 측정 결과를 정리하였다.

표 2. 4병렬 강압형 컨버터의 전기적 사양  
Table 2. Design parameters for 4-parallel step-down dc/dc converters

# of Conv.	Test Condition		Phase Margin Phase(deg)	Gain Margin Gain(dB)
	Vin[V]	Load[W]		
3	36	Min. 120	58.407	31.639
	36	Max. 1,260	57.626	32.698
	45	Max. 1,260	58.195	24.236
	52.65	Min. 120	49.785	22.447
	52.65	Mid. 840	58.368	27.501
	52.65	Max. 1,260	59.158	31.950
4	36	Min. 180	53.053	29.382
	36	Max. 1,260	53.066	30.531
	45	Max. 1,260	52.326	32.246
	52.65	Min. 180	43.934	18.320
	52.65	Mid. 840	53.948	32.009
	52.65	Max. 1,260	53.577	32.074

표 2의 측정결과에서 4-병렬 컨버터의 실제 동작 조건 중, 루프이득 측면에서 가장 열악한 동작 조건은 4개 컨버터 동작, 최대 입력 전압 및 최소 부하 조건임을 확인 할 수 있다. 해당 조건에서 위상 마진은 최소 40Deg 이상, 이득 마진은 최소 15dB 이상으로 본 논문에서 설계된 제어를 적용한 4-병렬 컨버터는 전 동작 구간에서 충분한 위상 및 이득 마진을 가지고 안정된 동작 특성을 가지는 것을 실험적으로 검증 및 확인 할 수 있다.

### 참고 문헌

- [1] 윤희광, “저게도 지상관측 위성 적용을 위한 전력조절분배 장치(28V Regulator)의 최종설계 검토자료”, 2008.11.