

Unregulated Power Bus 시스템 적용을 위한 컨버터 모듈화 연구

박성우*, 장성수**, 장진백***, 이상곤****

A Study on the Modularization of Converters for Unregulated Power Bus System Application

Sung-Woo Park*, Sung-Soo Jang**, Jin-Baek Jang***, Sang-Kon Lee****

Abstract

In this study, we examine a large number of methods for paralleling power converter, many current control techniques and the causes and solutions of the current unbalance that occurs at the application of a paralleling scheme. For each paralleling schemes, we inspect the merits and drawbacks and analyze the characteristics of each current control methods. With previously examined and analyzed results, we develop a modularizing method that can be available for unregulated bus system. And finally, we verify the possibility of the chosen modularizing method by executing simulation and performing prototype experiment.

초 록

본 연구에서는 전력 컨버터를 병렬 사용하는 여러 가지 모듈화 방법과 전류제어 방법, 컨버터를 병렬 사용 할 경우 발생하는 모듈 간 전류 불균형(current unbalance)의 원인과 해결 방법에 대해서 알아보며, 각각의 모듈화 방법의 장단점과 전류 제어방법의 특성을 해석한다. 기존의 모듈화 및 전류 제어방법에서 unregulated bus 방식을 사용하는 위성의 solar power regulator용 컨버터의 모듈화에 적용 가능한 응용 방법을 검토한다. 마지막으로 적용 가능한 응용방법을 2-병렬 모듈 컨버터에 적용하여 시뮬레이션과 prototype 제작을 통한 실험으로 적용 가능성을 확인한다.

키워드 : 병렬모듈 컨버터(parallel-module converter), 전류 불균형(current unbalance), 전류 분배(current sharing), unregulated bus system

* 위성전자그룹/swpark@kari.re.kr

*** 위성전자그룹/jjb@kari.re.kr

** 위성전자그룹/ssjang@kari.re.kr

**** 다목적위성체계그룹/skon@kari.re.kr

1. 서 론

기존 시스템의 전력 용량 증가로 대 전력의 전원 장치를 새롭게 개발할 경우, 기존의 전원을 모듈화 하여 사용할 수 있다면, 개별 소자에 대한 특성 검토, 노이즈나 방열문제 등을 쉽게 해결할 수 있을 뿐만 아니라 고 신뢰도의 대형 전원장치를 짧은 시간에 구현 할 수 있다. 즉, 기존의 소용량 전원의 모듈화를 통해서 소용량 모듈의 수를 변화시킴으로서 대용량 전원 시스템을 쉽게 구현할 수 있게 된다. 이와 같이 대용량 전원을 소용량의 전원을 모듈화 함으로서 구현하는 방법은 대형 중계기 등의 통신장치나 컴퓨터 전원 시스템뿐만 위성 전원장치등에도 이미 널리 사용되고 있다. 본 문서에서는 컨버터를 병렬 동작시키는 기존의 여러 가지 제어 방법에 대해서 알아보고, unregulated bus방식을 갖는 시스템에 적용 가능성을 검토해 본다.

일반적으로 대용량의 전원단 컨버터를 소용량 컨버터의 병렬 모듈로 구현할 경우 단일 대용량의 전원을 사용할 경우에 비해 아래와 같은 여러 가지 이점을 얻을 수 있다.

- 1) Higher efficiency
- 2) Better dynamics response
- 3) Better load response
- 4) Increased fault tolerance
- 5) More easy to design
- 6) More easy to maintenance
- 7) Allows redundancy implementation

하지만, 위와 같은 여러 가지 이점에도 불구하고, 컨버터의 병렬 동작 시, 모듈 간 전류분배(current sharing)가 적절히 이루어지지 않을 경우 특정 모듈에 대부분의 부하 전류가 흐르게 되어, 해당 모듈의 과중한 부하로 인해 전체 시스템에 치명적인 손상을 가할 수 있다. 다음 장에서 여러 가지 병렬 모듈화 방식과 모듈화 구성에서 다양한 모듈의 전류 제어방법 및 컨버터의 병렬 모듈화에서 발생하는 모듈 간 전류 불균형의 원인과 해소 방법에 대해서 알아본다.

2. 컨버터의 모듈화 방법

2.1 다양한 모듈화 방식

컨버터의 모듈화 방식은 전류 분배(current sharing) 제어 방법에 따라 'Droop 방식'과 'Active current-sharing 방식'의 두 가지로 나눌 수 있다.

먼저 Droop 방식은 특정 모듈의 부하 전류가 다른 모듈에 비해 증가할 경우 그 모듈의 출력 전압을 낮추는 방향으로 PWM 값을 조절하여 모듈 간 전류 불균형(current unbalance)을 감소시키는 방법이다. Droop 방식은 사용성이나 확장성이 뛰어나며, 각 모듈(module)의 제어기 사이에 wire-connection이 없는 장점이 있지만, 전류 분배 능력을 높이기 위해서 출력 전압 regulation 특성을 희생해야 하는 단점이 발생한다. 따라서 droop 방식에서는 전류 분배 능력과 출력 전압 regulation 특성을 적당히 조절할 필요가 있다. 뿐만 아니라, Droop 방식은 기본적으로 개 루프(open-loop) 제어 방식이므로 active current-sharing방식에 비해 전류 분배 능력이 떨어진다.

현재 사용되고 있거나 연구되어 병렬 컨버터에 적용될 수 있는 Droop 방식에는 대략 다음의 5가지 정도가 있다.

- 1) Inherent droop feature 방식
- 2) 직렬 resistor를 사용한 voltage droop 방식
- 3) Output current feedback을 통한 voltage droop 방식
- 4) Low DC gain을 이용한 current mode 방식
- 5) Nonlinear gain을 이용한 scheduling Control 방식

DCM (Discontinuous Conduction Mode)에서 동작하는 Buck, Boost 컨버터나 직렬 공진형 컨버터(series resonant converter)를 병렬로 사용할 경우 각각의 전원단은 기본적으로 모듈 간 전류 분배능력을 가지고 있으며, 엄격한 출력 전압 regulation이 요구되지 않는 병렬 모듈 시스템에서 사용되고 있다. 직렬저항을 사용하는 2)번 방

식은 모듈에 흐르는 전류량이 클 경우, 추가된 직렬 저항에서의 전력 소모가 상당히 커지게 되므로 현재 저 전력 선형 regulator등에만 제한적으로 사용되고 되고 있다.

3)번 방식에서는 작은 값의 저항을 출력과 직렬로 추가한 후, 저항 양단의 전압을 감지하여 부하 전류에 비례하는 양만큼 출력 전압을 droop 시키는 방법을 사용한다. 4)번 방식은 전류모드 제어 전원에서 보상기 피드백의 커패시터를 제거한 것과 동일하다. 이 경우 보상기는 더 이상 적분기 형태를 가지지 않게 되고, 낮은 DC 이득을 가지게 되어, 출력 전압에서 droop 특성을 나타낸다.

Active current sharing 방식에는 현재 3가지의 제어 방법과 6가지의 전류 프로그래밍 (current programming) 방식이 알려져 있어, 이 조합으로 이론상 대략 18가지 정도의 가능한 active current-sharing 방식을 생각 할 수 있다. Active current sharing 방식을 사용하기 위해서는 각 모듈마다 current-sharing 제어 루프가 추가되어야 된다. 병렬 컨버터의 active current sharing 방식에 사용되는 제어 방법에는 크게 다음의 3가지 방식이 있다.

- 1) 한 개의 기준 전압, 전압 피드백(voltage feedback)과 보상기를 모듈들이 공유 하는 Inner Loop Regulation (ILR) 방식
- 2) 각각의 모듈이 독립된 전압 피드백과 보상기를 갖는 Outer Loop Regulation (OLR 방식)
- 3) 전류 분배를 위해서 별도의 제어기를 사용하는 External Controller(EC) 방식

2.1.1 Inner Loop Regulation 방식

일반적인 ILR active current-sharing 방식의 병렬 컨버터 구조는 그림 1과 같다. 이와 같은 구조를 가지는 ILR 방식은 모듈의 수에 따라 전체 병렬 시스템의 동특성이 변하며, 병렬 모듈이 하나의 보상기를 포함한 하나의 전압 궤환 루프 (voltage feedback loop)를 공유하기 때문에 각 모듈을 독립적으로 동작 시킬 수 없어 fault tolerance가 떨어지는 단점이 있지만, 모듈 간 전

류 분배가 매우 안정되며, 출력 regulation을 정확하게 할 수 있는 장점이 있다.

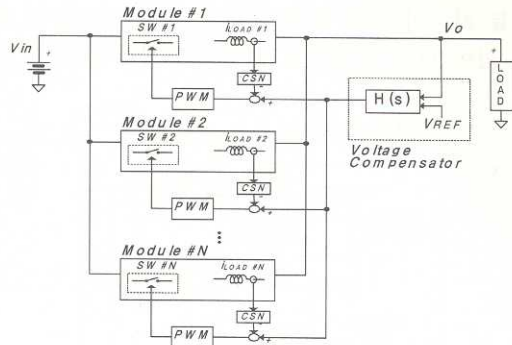


그림 1. Inner Loop Regulation 방식

2.1.2 Outer Loop Regulation 방식

그림 2에 나타난 것과 같은 일반적인 구조를 가지는 OLR(Outer Loop Regulation) active current sharing 방식은 ILR 방식과 달리 각각의 모듈이 독립된 전압 피드백 루프를 가지고 있다. 따라서 OLR 방식은 각 모듈을 독립적으로 동작 시킬 수 있어, ILR 방식보다 뛰어난 모듈 확장성을 가지며 시스템 유지가 용이하다. 하지만, transient 상태에서 시스템이 불안해질 가능성으로 인해 전압 피드백 루프의 이득을 충분히 키울 수 없어 출력의 동특성은 ILR 방식에 비해 다소 떨어진다.

2.1.3 External Controller 방식

마지막으로 그림 3에 나타난 것과 같이 전류 분배를 위해서 별도의 외부 제어기를 사용하는 방법이 있다. 이 방식은 ILR이나 OLR 방식과는 달리 별도의 추가적인 제어기가 필요하며, 모듈 제어기 사이에 별도의 신호선이 추가 연결되어 전체 병렬 모듈이 복잡해지는 단점이 있다. 뿐만 아니라, 모든 제어기가 서로 연관되어 동작하므로 하나의 제어기가 불량일 경우 더 이상 전류 분배(current sharing) 동작을 수행 할 수 없고, 이것은 전체 시스템의 신뢰도를 크게 위협할 수 있다. 이와 같은 이유로 discrete 소자를 사용한

EC 방식은 널리 사용되지 않았으나, 현재는 여러 반도체 소자 제조업체에서 많은 Load Sharing IC를 내어놓고 있고, 이를 사용할 경우 모듈 사이의 전류 분배를 쉬고 확실하게 구현 할 수 있어 여러 분야에서 많이 사용되고 있다.

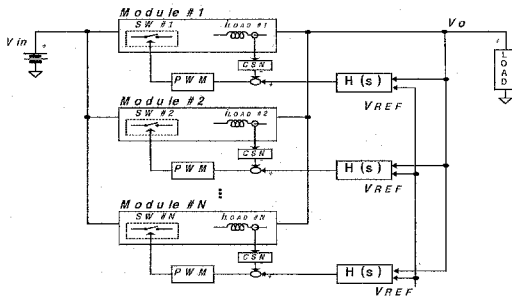


그림 2. Outer Loop Regulation 방식

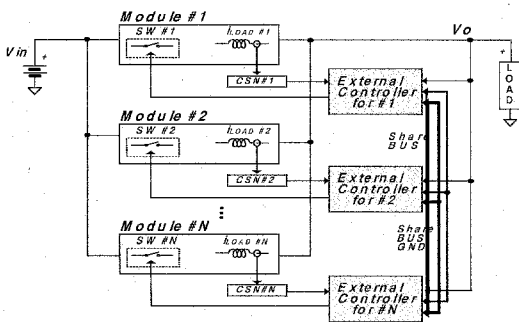


그림 3. External Controller 방식

2.2 병렬 모듈에서 전류 불균형

일반적으로 DC/DC 컨버터의 출력 임피던스(output impedance)는 매우 낮기 때문에, 각 모듈 출력 전압의 작은 차이도 각 모듈에 흐르는 전류에는 큰 차이를 발생시킬 수 있다. 이와 같은 모듈 간 전류 불균형의 원인은 각 모듈의 전원단에 사용되는 반도체 소자의 ON, OFF 특성 차이나 도선의 길이 불일치로 인한 기생 저항과 같은 전원단의 기생성분 차이로 인해서 발생 할 수 있다. 이런 전기적 특성 차이가 각 모듈의 출력 임피던스 차이를 발생시키고, 이것이 모듈 간 전류 불균형의 원인이 된다. 다음으로는 각 모듈

에 사용되는 보상기의 특성 차이로 인해서 발생할 수 있다. 일반적으로 컨버터는 폐 루프(closed loop)로 사용되는데, 전원단의 특성이 동일하더라도 각 모듈 보상기 특성의 미소한 차이가 폐 루프로 동작하는 모듈의 출력 임피던스 특성에 차이를 발생 시키게 된다.

소자의 전기적 특성 차이로 인해 전류 불균형이 발생하는 것을 검증해보기 위한 회로를 그림 4에 나타내었다. 이 시뮬레이션에서는 두 개의 모듈이 서로 다른 코일 기생저항을 가진 경우를 가정하였다. 그림 5의 결과에서 알 수 있듯이 부하 전류가 10A일 경우, 두 모듈에는 각각 6.25A와 3.65A의 전류가 흘러 $\pm 27\%$ 로 큰 량의 전류 불균형이 발생하였다.

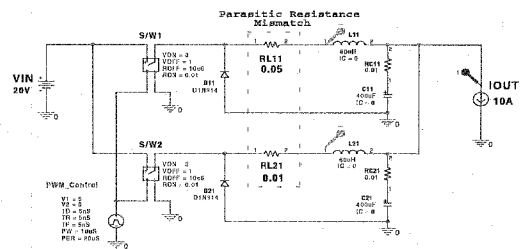


그림 4. Schematic for parasitic resistance mismatch simulation

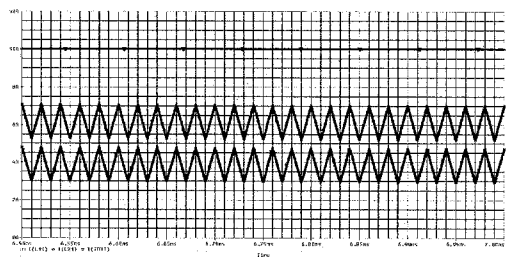


그림 5. Simulation results for parasitic resistance mismatch: Load current, output current of the module #2, output current of the module #1

폐 루프(closed-loop)로 동작하는 병렬 모듈 컨버터에서 전원단의 특성이 모두 동일하더라도 보상기의 특성에 차이가 발생할 경우 각 모듈의 출력 임피던스(output impedance)에 차이가 발생해

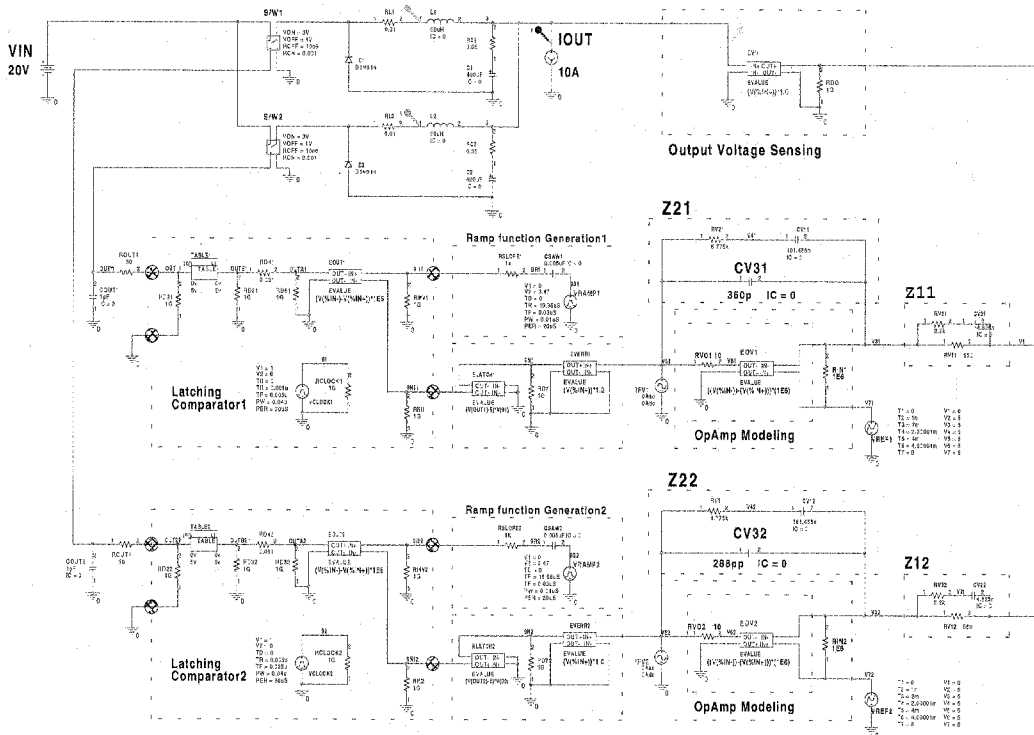


그림 6. Schematics for compensator mismatch simulation

모듈 간 전류 불균형(current unbalance)이 발생하는 것을 검증하기 위한 모의 실험 회로도라 결과물 그림 6과 그림 7에 나타내었다. 모듈1과 모듈2 전압 보상기의 소자 CV31과 CV32의 값에 20% 차이가 발생할 경우 각 모듈의 전류 불균형량이 대략 $\pm 20\%$ 로 매우 크게 발생하는 것을 볼 수 있다.

2.3 Unregulated bus 시스템에서 전류분배

Unregulated bus 시스템에서는 bus 전압을 regulation 하지 않으므로, 출력 전압 궤환(output voltage feedback)방식을 사용하지 않는다. 2.1에서 검토한 병렬 방식 중 active current sharing 방식은 모두 전압 궤환 루프를 포함한 구조로 되어 있으므로, 이 방식들은 unregulated bus 방식을 적용한 시스템에 적합하지 않다. Droop 방식 중 3)~5)번 방

식들도 출력전압 궤환 루프를 포함한 구조를 가지고 있다. Droop 방식 중 출력에 직렬로 저항을 추가하는 두 번째 방법은 동작 전류량이 큰 위성의 SAR(solar array regulator)와 같은 DC/DC 컨버터에서는 앞서서도 설명되었듯이 직렬 저항에서 소비되는 전력이 문제가 될 수 있으므로 고려 대상에서 제외된다. 따라서 droop 방식 중 unregulated bus 방식을 사용하는 시스템에서 사용 가능한 방식은 'Inherent Droop Feature'를 사용한 것이거나 이 방식을 응용한 것이 되어야 한다. Active current-sharing 방식을 unregulated bus 방식에 사용하기 위해서는 기존의 전류 모드 제어(current-mode control) 방식에서 출력 전압 궤환없이 전류 루프 특성만을 응용하여 적용해야 된다. 다음 절에서 전류 루프만 적용한 모듈에서의 전류 분배 특성을 알아보고, unregulated bus 시스템에 적용가능한지 검토 한다.

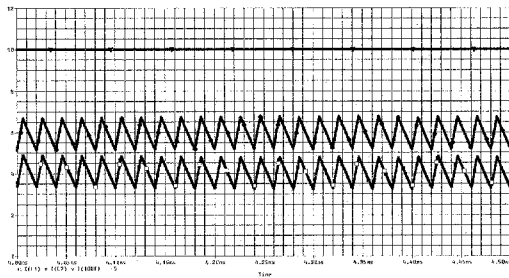


그림 7. Simulation result for compensator mismatch case: Load current, output current of the module #2, output current of the module #1

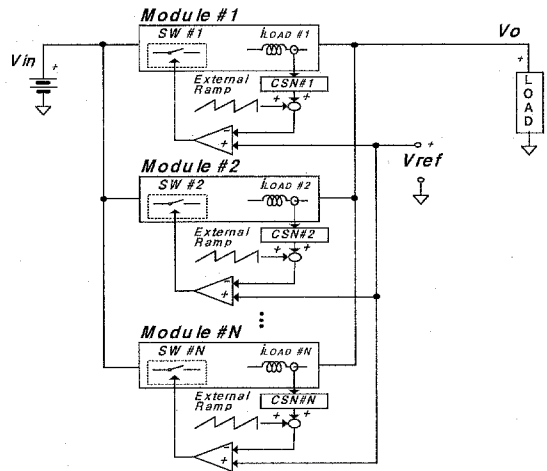


그림 8. Parallel modules with only current-loop

3. 전류 루프(current-loop)를 가진 병렬 제어방식

일반적인 DC/DC 컨버터는 출력 전압을 원하는 값으로 제어하기 위해서 출력 전압을 폐환해서 사용하는 전압 루프 (voltage-loop)가 존재한다. 하지만, unregulated bus 시스템에서는 출력 전압을 제어하지 않으므로 전압 루프가 필요 없다. 이 장에서는 병렬 모듈들의 전류 불균형을 개선하기 위해서 각 컨버터의 스위치를 제어하기 위한 PWM 신호의 생성에 전류 루프 (current loop)를 사용하는 방법에 대해 시뮬레이션과 prototype 제작하여 검증하여 본다.

3.1 전류 루프를 가진 병렬모듈 컨버터

각 모듈의 스위치를 제어하기 위한 PWM 신호를 만들기 위해 해당 컨버터의 스위치 전류(또는 인덕터 전류)를 감지해서 사용한다. 그리고 $D > 0.5$ 구간에서 컨버터가 발진하는 것을 방지하기 위해서 외부 ramp 신호를 추가하였다. 위에서 만들어진 신호는 해당 모듈의 전류에 대한 정보를 가지고 있으므로, 이 신호를 일정한 기준 신호(reference voltage)와 비교하여 각 모듈의 PWM 신호를 만들므로써 병렬 모듈에 대한 전류 분배를 구현 할 수 있다. 그림 2.6에 전류 루프를 사용한 병렬 컨버터를 나타내었다

위의 그림에서 보듯이 각 모듈은 모두 동일한 기준 전압(reference voltage)과 외부 램프 신호(external ramp signal)를 받는다. 따라서 병렬 동작 중 모듈 간 전류 불균형이 발생하더라도 전류 루프(current-loop)에 의해 전체 모듈에 동일한 전류가 흐르는 방향으로 각 모듈의 PWM 값이 제어된다.

3.2 시뮬레이션 결과

그림 8에서와 같이 전류 루프만을 사용한 병렬 컨버터 모듈을 Buck 컨버터에 대해 적용해 보았다. 병렬 Buck 모듈에 대해 전류 불균형 시뮬레이션을 위한 Schematics를 그림 9에 나타내었다. 각 모듈은 인덕터 기생 저항 값이 다른 경우를 가정하였고, 외부 램프신호는 시뮬레이션의 편의를 위해서 동일한 특성을 갖는 별개의 전원을 사용하였다. 실제 CT(Current Transformer)를 사용하여 측정하는 스위치 전류는 Spice의 ABM (Analog Behavioral Modeling)를 사용하여 구현하였다. 각 모듈은 자신의 스위치 전류 성분을 사용한 PWM 신호로 제어된다. 그림 10과 그림 11은 각각 개 루프(open-loop)와 전류 루프가 닫힌 상태에서의 전체 부하전류, 모듈 #1, 모듈 #2의 출력 전류를 나타낸다.

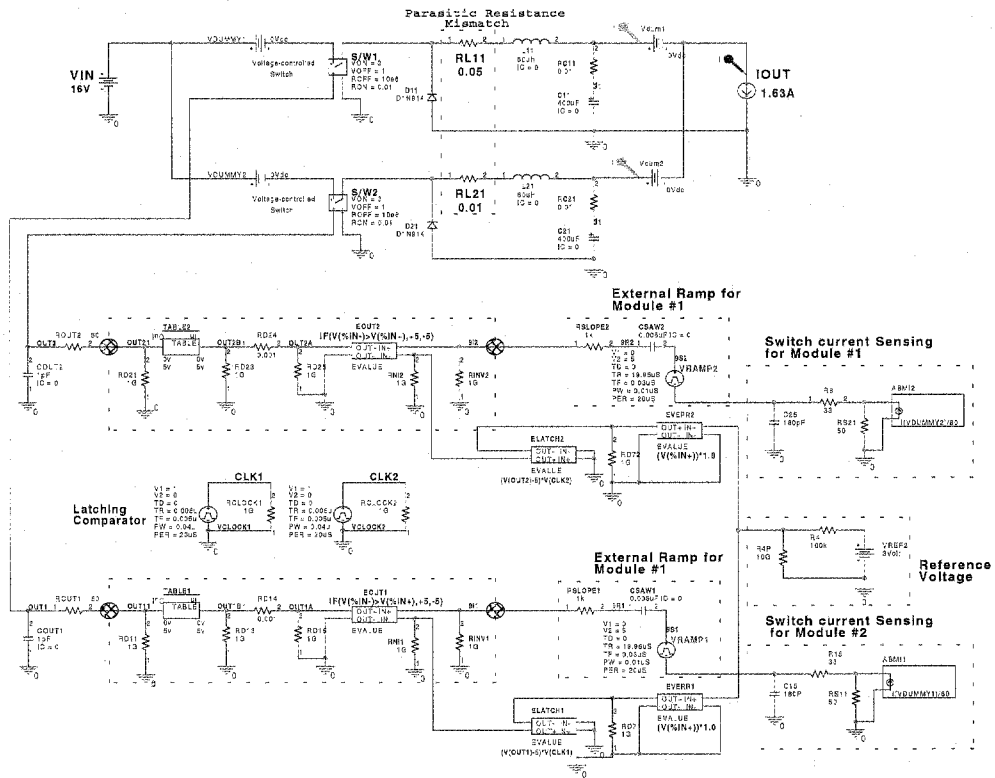


그림 9. Schematic for parallel module converters with only current-loop

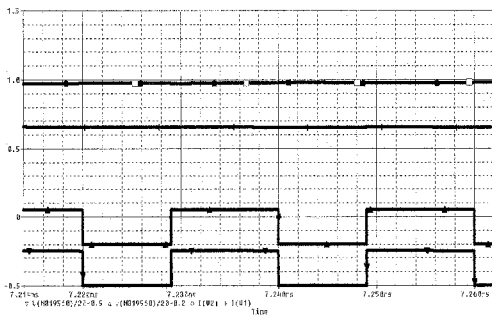

 그림 10. Simulation result for open-loop case:
 Output current of the mod. #2, output current of the mod. #1, PWM for S/W2, PWM for S/W1

그림 11의 시뮬레이션 결과와 표 1에서 보듯이 각 모듈의 전류 성분을 각각의 스위치를 제어하기 위한 PWM 신호 발생에 사용할 경우 모듈

간 전류 불균형 량은 20%에서 2%수준으로 거의 완전히 개선 될 수 있음을 볼 수 있다

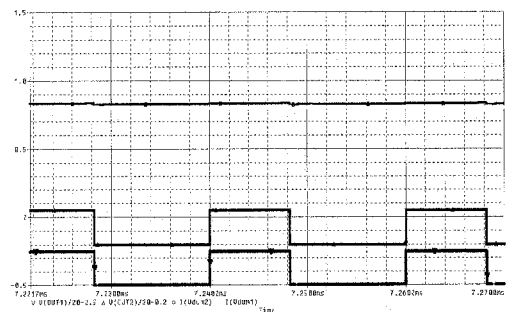


그림 11. Simulation result for current-loop closed case: Output current of the mod. #2, output current of the mod. #1, PWM for S/W2, PWM for S/W1

3.3 실험 결과

3.2에서 시뮬레이션을 수행한 병렬 컨버터의 prototype을 제작하여 동일한 입력 및 부하 조건에서 모듈 간 전류 불균형에 대해서 검증하였다. 그림 12와 그림 13은 각각 개 루프(open-loop)와 전류 루프가 닫힌 상태에서 병렬 컨버터 각 모듈의 전류를 나타낸다.

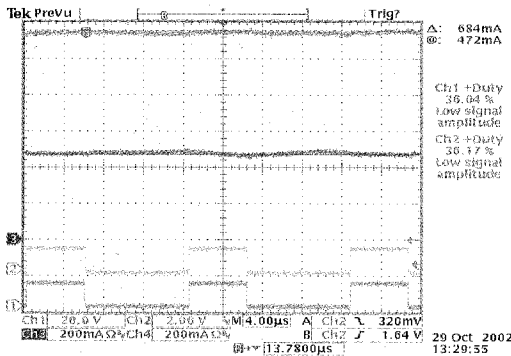


그림 12. Experimental result for open-loop case: Output current of the mod. #2, output current of the mod. #1, PWM for S/W2, PWM for S/W1

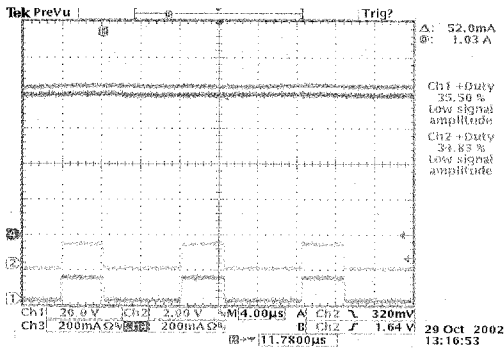


그림 13. Experimental result for current-loop closed case: Output current of the mod. #2, output current of the mod. #1, PWM for S/W2, PWM for S/W1

개 루프 병렬 모듈 실험의 경우, 시뮬레이션에서 고려되지 않은 소자의 전기적 특성차이, 인덕

터 저항이외의 여러 기생성분으로 인해 실험결과와 다소 차이가 발생하는 것을 볼 수 있다. 하지만, 모듈별 전류량을 정리한 표 1에서 보듯이 전류 루프가 닫힌 병렬 모듈의 경우, 시뮬레이션 결과와 거의 일치하며, 모듈 간 전류 분배가 잘 이루어지는 것을 알 수 있다.

표 1. 모듈별 전류 분배 결과

모듈/전류불균형 실험조건		모듈 #1 [mA]	모듈 #2 [mA]	전류 불균형 [%]
open-loop	시뮬레이션	653	976	±19.8%
	prototype	475	1155	±41.7%
current-loop	시뮬레이션	799	830	±1.9%
	prototype	790	840	±3.0%

4. 결 론

표 1에서 보듯이 각 모듈의 전류를 측정하여 해당 모듈의 PWM 신호 발생에 사용할 경우, 모듈 간 전류 불균형 문제는 해결 할 수 있다. 각 모듈의 전류 루프가 닫힌 경우, 출력 전류(또는 전력)와 전압, 기준 전압(reference voltage)과의 관계가 명확히 정의되고, 병렬 모듈의 동특성에 대한 검증이 이루어진다면, unregulated bus 시스템의 병렬 모듈에서 전류 불균형 문제를 해결하는 제어 방법으로 사용될 수 있다.

본 연구에서는 컨버터를 병렬 사용하는 여러 방법에 대해서 검토 하였으며, 병렬 구조로 컨버터를 사용할 경우 발생하는 전류 불균형 현상을 소자특성 불일치와 제어가 불일치 두 경우에 대해 시뮬레이션을 통해 확인하였다. 또한, 여러 병렬 제어 방법에 대해서 unregulated bus 방식을 사용하는 위성에의 적용 가능성을 검토하였다. 마지막으로 전류 루프(current-loop)를 닫은 Buck 컨버터 병렬 구조에 대해서 시뮬레이션과 prototype 제작을 통해 전류 불균형(current unbalance) 개선을 확인 하였다.

참 고 문 헌

1. Shiguo Luo, Z. Ye, R. Lin and Fred C. Lee, "A Classification and Evaluation of paralleling Methods for Power Supply Modules", PESC '99 Proc., pp.901~908.
2. C. Jaerson, C. Mullet, "Paralleling supplies via various droop methods", in High Frequency Power Conversion (HFPC) Conference, apl. 1994, pp.68~76.
3. B. Choi, "Dynamics and control of switchmode power conversions in distributed power systems", ph.D. Dissertation, VPEC, EE Department, Virginia Tech, Blacksburg, VA24061, May 1992.
4. R-H. Wu, T. Kohama, Y. Kordra, "Load-Current sharing for parallel operation of dc-dc converters", in Power Electronics Speciallists Conference(PESC) 1993, pp.101~107.
5. J. Perkinson, "Current sharing of redundant DC-DC converters in high availability systems-a simple approach", APEC Proc. pp. 952~956.
6. John S. Glaser, "Output Plane Analysis of Load-Sharing in Multiple-Module Converter Systems", IEEE Trans. On P.E., Vol.9, No.1, Jan. 1994, pp.43~50.
7. Joe Bocek et al., "Determining Current Sharing Criterion for Parallel Operation of Power Converters in Multi-module BUS System", PESC '90, pp.1105~1111.
8. Liold Dixon, "Spice simulation of Switching Power Supply Performance".