

# 고 입력전압 전력변환 응용에 적합한 입력직렬-출력병렬 컨버터 시스템

김정원, 조보형  
서울대학교 전기공학부

## Input Series-Output Parallel Connected Converter System for High Voltage Power Conversion Applications

Jung-Won Kim, Bo-Hyung Cho  
School of Electrical Engineering, Seoul National University

### Abstract

In this paper Input Series-Output Parallel connected converter configuration for high voltage power conversion applications is proposed and a control method to solve the problems of Input Series-Output Parallel connected converter configuration is introduced. In this configuration snubber circuit or voltage balancing controller that is necessary for the series connection of switching devices is not needed.

The effectiveness of this proposed configuration is verified by simulation.

### 1. 서론

입력 전압이 높은 전력변환 응용에서는 입력 전압 정격에 적합한 스위칭 소자가 존재하지 않는 경우가 있다. 이 경우 기존의 회로에 스위칭 소자를 직렬로 연결하여 사용하거나 입력 전압에 맞는 새로운 회로를 개발하기도 한다. 스위칭 소자를 직렬로 사용할 경우, 스위치 오프 시 스위칭 소자 사이의 전압 균형을 유지하여야 한다. 스위칭 소자의 전압 균형을 유지하기 위해서는 스너버를 이용하는 방법과 소자 전압을 직접 제어하는 방법이 있다. 스너버를 사용할 경우에는 추가의 손실이 발생하고 스위칭 속도에도 한계가 있다. 그리고, 소자 전압을 직접 제어할 경우에는 복잡한 제어회로가 요구되며 스위칭 소자의 스위칭 속도가 점점 증가함으로 인하여 균등한 전압제

어를 하는 것이 매우 어렵다[1-4].

위에서 언급한 문제점 때문에 스위칭 소자를 직렬로 사용하지 않는 새로운 회로가 개발되기도 한다 [5]. 그러나, 입력 전압 정격이 변화할 경우 입력 전압에 맞는 새로운 회로를 다시 개발하여야 하며 개발비의 상승을 초래한다.

본 논문에서는 이러한 문제점을 해결하기 위하여 기존의 회로를 사용하면서도 스위칭 소자를 직렬로 연결하여 사용하지 않아도 되는 컨버터 시스템을 제안한다.

### 2. 입력직렬-출력병렬 컨버터 시스템

그림 1은 제안된 입력직렬-출력병렬 컨버터 시스템을 보여준다.

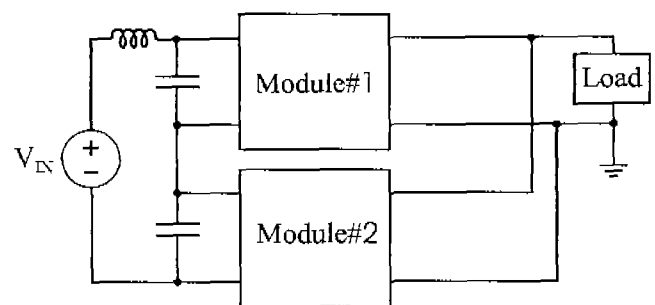


그림 1. 입력직렬-출력병렬 컨버터 시스템

두 모듈이 입력은 직렬로 출력은 병렬로 연결되어 있다. 입력 전압에 따라 모듈의 개수는 가변할 수 있다. 각 모듈의 입력 접지가 다르고 출력이 병렬로 연결되어 있으므로 각 모듈에는 1차측과 2차측을 절연시켜주는 변압기가 필요하다. 이 시스템에서 입력 전압은 직렬 연결된 입력 커패시터에 의해서 배분된다. 스위칭 소자를 직렬로 연결하여 사용하지 않으므로 전압 균형을 위한 스너버가 필요 없으므로 스너버 손실이 없으며 소자 전압을 제어하기 위한 회로가 필요 없다. 또한, 절연 변압기가 있는 기존의 회로를 사용할 수 있다. 그러나 스위칭 소자를 직렬로 연결하여 사용하는 경우보다는 수동 소자의 개수는 증가한다. 그런데 일반적으로 모듈화를 할 경우 시스템의 부피는 감소하므로 전체 시스템의 부피는 줄일 수 있다[7].

### 3. 입력직렬-출력병렬 Forward 컨버터 시스템의 분석

그림 2는 입력직렬-출력병렬 Forward 컨버터 시스템을 보여준다.

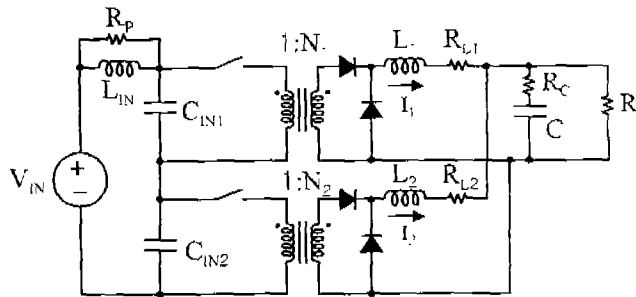


그림 2. 입력직렬-출력병렬 Forward 컨버터 시스템

두 개의 Forward 컨버터가 입력은 직렬로 출력은 병렬로 연결되었다. 두 모듈의 소자들이 동일하다고 가정하고 소신호 분석을 통하여 전달함수를 구하면 듀티에서 각 모듈의 인덕터 전류와 입력 커패시터 전압까지의 전달함수가 일치함을 알 수 있다. 그러므로 입력직렬-출력병렬 Forward 컨버터는 식(1)에 의해서 단일 모듈 Forward 컨버터로 간략화될 수 있다.

$$L_{IN}' = L_{IN}/2, C_{IN}' = C_{IN1} = C_{IN2}, L' = L_1/2 = L_2/2, R_L = R_{L1}/2 = R_{L2}/2, C' = C, R_C' = R_C, V_{IN}' = V_{IN}/2 \quad (1)$$

그림 3은 간략화된 등가 단일 모듈 Forward 컨버터를 보여준다.

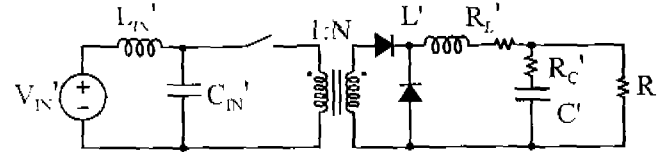


그림 3. 간략화된 등가 단일 모듈 Forward 컨버터

그림 3의 간략화된 모델을 사용하여 입력직렬-출력병렬 Forward 컨버터 시스템의 출력전압 제어를 구성할 경우 그림 2의 모델을 사용하는 경우보다 간단히 제어를 설계할 수 있다.

### 4. 시뮬레이션과 입력직렬-출력병렬 컨버터 시스템의 문제점

간략화된 등가 단일 모델을 사용하여 그림 4와 같이 하나의 출력전압 제어를 구성하여 시뮬레이션을 수행하였다. 시뮬레이션에 사용된 회로의 소자값은 그림과 같다. 컨버터의 스위칭 주파수는 300kHz 이고 입력 전압은 1000V, 출력 전압은 5V, 출력 전류는 30A이다.

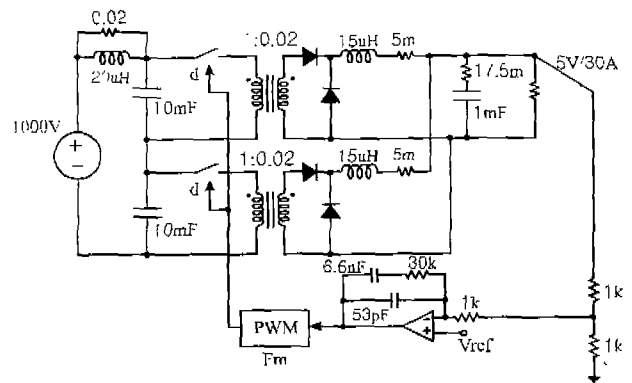


그림 4. 시뮬레이션 모델의 회로도

앞의 분석 결과와 같이 두 모듈의 소자 값이 일치하면 두 모듈의 출력 전류와 입력 전압은 입력 전압 변동이나 부하 전류 변동에도 균형을 이룸을 확인할 수 있었다. 그러나, 모듈 소자 값이 동일하지 않을 경우, 특히 입력 커패시터 값이 차이가 날 경우 그림 5에서와 같이 입력 전압이 변동할 때 커패시터 값이 작은 모듈의 입력 전압이 다른 모듈의 입력 전압보다 빨리 변화하게 되어 입력 전압이 불균형하게 되

고 결과적으로 출력 전류의 불균형을 초래한다. 입력 전압이 높은 모듈의 출력 전류는 다른 모듈보다 높으므로 입력 전압은 떨어지게 되어 정상상태에서는 입력 전압과 출력 전류가 균형을 이루게 되지만 과도상태에서 전류 불균형에 의한 전류가 소자의 정격을 넘으면 컨버터의 고장을 유발할 수 있다. 그러므로 출력 전압 제어기 하나만으로 입력직렬-출력병렬 컨버터 시스템을 구성하는 데에는 문제가 있음을 알 수 있다.

그러므로 이러한 문제점을 해결할 수 있는 제어가 필요하다.

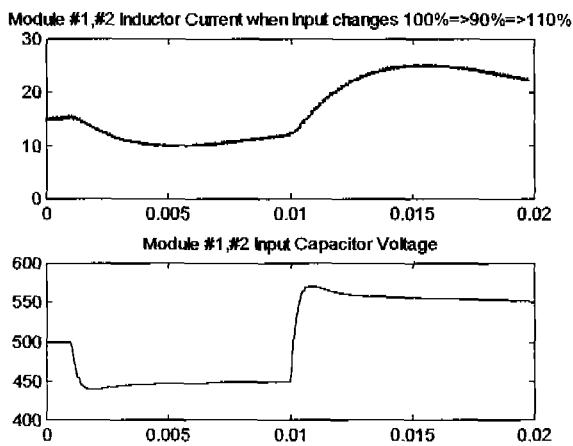


그림 5. 모듈이 동일하지 않을 경우의 입력 전압 변동 시 시뮬레이션 파형(전류[A], 전압[V])

### 5. 입력 전류 균형 제어

앞에서 언급한 문제를 해결하기 위해서 두 모듈의 출력 전류가 균등하게 되도록 제어하는 방법을 택할 경우 제어에 의해 출력 전류가 균형을 이룬지라도 변압기의 권선비에 차이가 있다면 입력 전류는 서로 다르게 된다. 이 경우 입력 전류가 높은 모듈의 입력 커패시터 전압은 계속 떨어지게 되고 입력 전류가 낮은 모듈의 전압은 계속 높아지게 된다. 결국 입력 전압이 스위칭 소자의 정격을 넘거나 입력 커패시터의 정격을 넘어서 컨버터의 고장을 초래한다. 그러므로 출력 전류를 제어해서는 안되고 입력 전류를 제어하여야 한다.

입력 전류를 제어할 경우 입력 커패시터의 전압이 낮은 모듈의 입력 전류가 낮다고 입력 전류를 높이기 위해 듀티를 키우게 되면 입력 커패시터 전압은 더욱 떨어지게 되고 입력 전류도 제어할 수 없다.

그래서 본 논문에서는 입력 커패시터의 전압이 높

은 모듈은 입력 전류를 제어하고 입력 커패시터의 전압이 낮은 모듈은 출력 전압을 제어하는 방법을 제안한다.

그림 6은 제안된 방법의 블록도를 보여준다. 제어를 위해서 입력 전류와 입력 전압을 측정 한 후, Comparator에서 입력 전압을 비교하여 비교 결과에 따라서 SW1과 SW2를 on,off하여 입력 전압이 높은 모듈은 입력 전류를 두 모듈의 입력 전류의 평균이 되도록 제어하고 입력 전압이 낮은 모듈은 출력 전압만을 제어하도록 한다. 그림에서 CBC는 Current Balancing Controller,  $K_v$ 는 출력 전압 감지 이득 (sensing gain)이다.

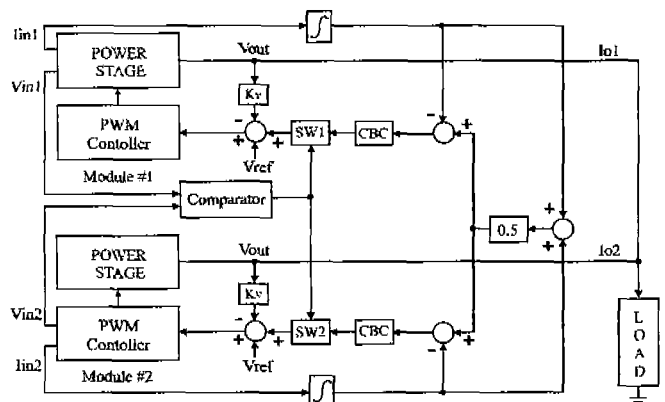


그림 6. 제안된 방법의 블록도

그림 7은 입력 전류 균형 제어를 적용한 시스템의 소신호 블록도이다. 그림은 모듈 1의 입력 커패시터 전압이 모듈 2의 입력 커패시터 전압보다 높을 경우이다.

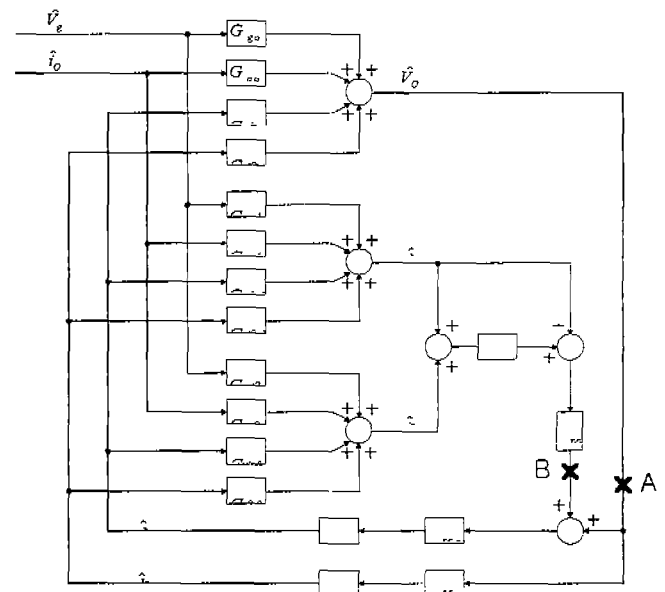
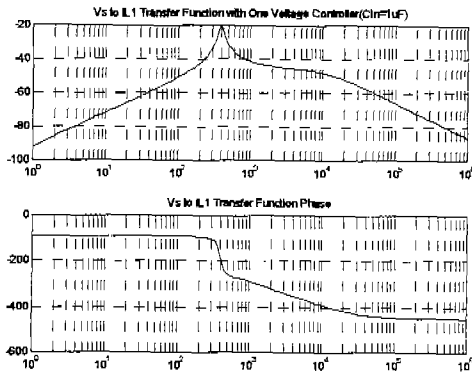


그림 7. 시스템의 소신호 블럭도

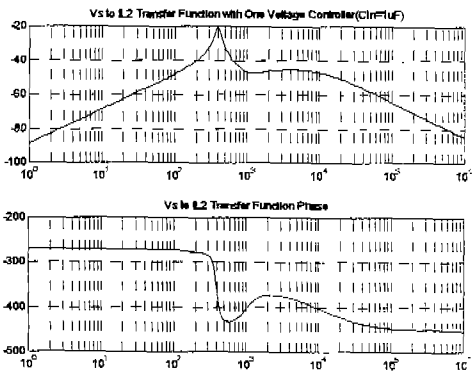
먼저, 하나의 전압 제어기로만 제어할 경우의 소신호 분석을 행하였다. 식(2)는 입력 전압 변동에 대한 각 모듈 입력 전류의 전달 함수이다.

$$\begin{aligned} \frac{\hat{i}_1}{\hat{v}_g} &= G_{gi1} - (G_{d1i1} + G_{d2i2}) \frac{FMK_V G_{go}}{1 + FMK_V (G_{d1o} + G_{d2o})} \\ \frac{\hat{i}_2}{\hat{v}_g} &= G_{gi2} - (G_{d2i2} + G_{d1i1}) \frac{FMK_V G_{go}}{1 + FMK_V (G_{d1o} + G_{d2o})} \end{aligned} \quad (2)$$

위의 전달 함수의 보드선도는 그림 8과 같다. 그림에서 두 전달함수 이득의 첨두점 위상이 180° 차이나므로 전류 불균형 현상이 발생함을 알 수 있다.



(a)  $\hat{i}_1/\hat{v}_g$  전달 함수

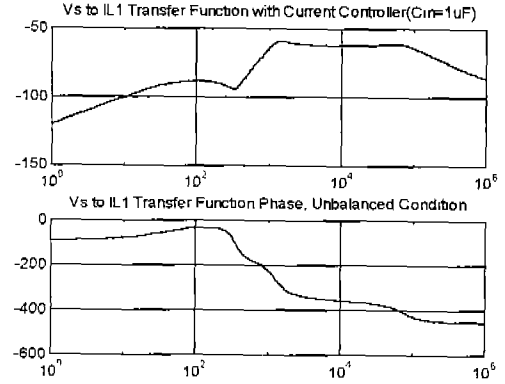


(b)  $\hat{i}_2/\hat{v}_g$  전달 함수

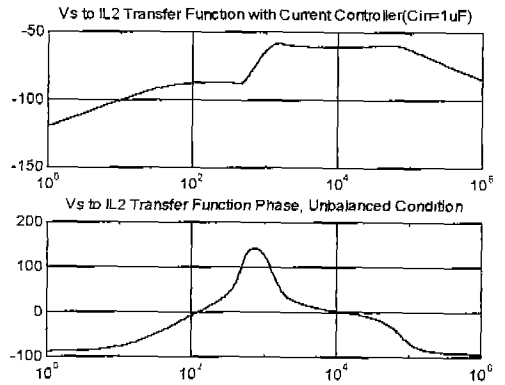
그림 8. 하나의 전압 제어기 사용 시 전달 함수

그림 9는 전류 제어기를 적용했을 경우의 입력 전압 변동에 대한 각 모듈 입력 전류의 전달 함수이다. 그림에서 이득이 -60dB 이하이며 전압 제어기로만 제어했을 경우보다 40dB 정도 줄어든 것을 알

수 있다.



(a)  $\hat{i}_1/\hat{v}_g$  전달 함수



(b)  $\hat{i}_2/\hat{v}_g$  전달 함수

그림 9. 전류 제어기 사용 시 전달 함수

## 5.1 제어 회로 설계

A지점에서 회로를 열고 폐회로 이득을 구하면 식(3)을 얻을 수 있다.

$$T_V = [FM(K_{V1}G_{d1o} + K_{V2}G_{d2o}) + 0.5FM^2 K_I K_{V1} K_{V2} \{G_{d1o}(G_{d2i2} - G_{d2i1}) + G_{d2o}(G_{d1i1} - G_{d1i2})\}] / \{1 + 0.5FMK_I K_{V1}(G_{d1i1} - G_{d1i2})\} \quad (3)$$

식에서  $K_{V1} \cong K_{V2}$ ,  $(G_{d2i2} - G_{d2i1}) \cong (G_{d1i1} - G_{d1i2})$ 이므로 식(3)은 식(4)로 간략화 되고 식(4)에서 전류 제어기가 전압 제어기에 영향을 미치지 않음을 알 수 있다. 그러므로 등가 단일 모듈로 전류 제어기와 독립적으로 전압 제어기를 설계할 수 있음을 알 수 있다.

$$T_V = FM(K_{V1}G_{d1o} + K_{V2}G_{d2o}) \quad (4)$$

그리고, B 지점에서 회로를 열고 폐회로 이득을 구하면 식(5)를 얻을 수 있다.

$$T_i = \frac{FMK_r K_v (G_{a1} - G_{a2})}{2} \quad (5)$$

전류 균형 제어기는 식 (5)를 이용하여 설계할 수 있다.

그림 10은 제안된 방법에 의해서 그림 5와 동일한 조건에서 시뮬레이션한 결과이다. 그림 5의 경우와는 달리 모듈간 출력 전류의 차이가 부하 전류의 10% 이내임을 알 수 있다.

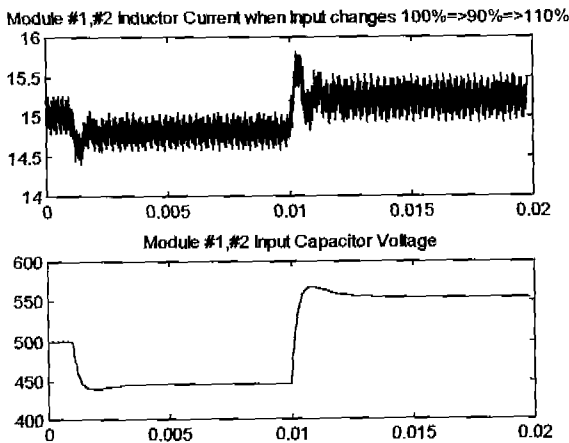


그림 10. 입력 전류 균형 제어 방법의 시뮬레이션 파형(전류[A], 전압[V])

## 6. 결론

본 논문에서는 고 입력 전압 전력 변환 응용에 적합한 입력직렬-출력병렬 컨버터 시스템과 그 제어 방법을 제안하였으며 시뮬레이션을 통하여 그 유효성을 검증하였다. 본 방법을 사용할 경우 스위칭 소자를 직렬 연결하여 사용함으로써 발생하는 스너버 손실을 제거할 수 있으며 복잡한 전압 균등 제어가 불필요하게 된다. 그리고 입력 전압이 변동할 경우 모듈의 개수만 바꿔주면 어떠한 입력 전압 정격도 만족시킬 수 있다. 그러나, 두 모듈이 동일하지 않을 경우 발생하는 출력 전류의 불균형 문제는 전압 제어기와는 독립적인 전류 제어기로 해결할 수 있다.

## 참고 문헌

- [1] Christian Gerster, " Fast High-power/High-Voltage Switch Using Series-connected IGBTs with Active Gate-controlled Voltage-balancing ", APEC'94 Proc., pp.469-472.
- [2] A. Consoli, S. Musumeci, G. Oriti and A. Testa, " Active Voltage Balancement of Series Connected IGBTs ", IAS'95 Proc., pp.2752-2758.
- [3] M. M. Bakran and M. Michel, " A Learning Controller for Voltage-Balancing on GTOs in Series ", IPEC'95 Proc., pp.1735-1739.
- [4] C. Gerster, P. Hofer and N. Karrer, " Gate-control strategies for snubberless operation of series connected IGBTs ", PESC'96 Proc., pp.1739-1742.
- [5] N. H. Kutkut, G. Luckjiff and D. M. Divan, " A Dual Bridge High Current DC-to-DC Converter with Soft Switching Capability ", IAS'97 Proc., pp.1398-1405.
- [6] K. Siri, C. Q. Lee and T. F. Wu, " Current Distribution Control for Parallel Connected Converter: Part 1 ", IEEE Trans. on Aerospace and Electronic Systems, Vol. 28, No. 3, July 1992, pp.829-840.
- [7] B. J. Masserant, E. W. Beans and T. A. Stuart " A Study of Volume vs. Frequency for Soft Switching Converters ", PESC'92 Proc. pp.625-632.