

평균전류모드제어 병렬 컨버터의 부하분담 제어 특성 분석

김진성, *김 양 모
국방과학연구소, *충남대학교 전기공학과

Analysis of the Load Share Control Characteristics of the Paralleled Converter

Jin-Sung Kim, *Yang-Mo Kim

Agency for Defense Development, Dept. of Electrical Engineering Chungnam National Univ.

Abstract - 본 연구에서는 부하의 급격한 변화 또는 병렬컨버터를 구성하는 단위컨버터의 고장 발생 시 안정적인 병렬컨버터의 운용을 위한 연구를 수행하였다. 단위컨버터는 응답특성을 개선하기 위하여 평균전류모드제어를 채택하였으며, 병렬컨버터의 부하전류분담을 위하여 최대전류제어법을 이용하였다. 병렬컨버터의 모델을 도출하여 부하전류분담 제어에 따른 동작특성을 분석하였다. 급격한 부하변화와 단위컨버터의 고장발생 시 안정된 병렬컨버터의 특성을 실험을 통하여 확인하였다.

1. 서 론

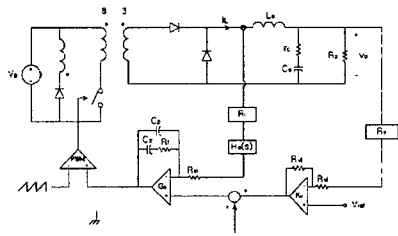
대용량 전기/전자장비용 전원장치는 고밀도, 고효율, 신뢰성, 확장성, 정비성 및 경제성이 고려되어야 한다. 이를 위하여 전원장치는 일반적으로 적정 용량의 단위컨버터를 여러 개 병렬로 구성한다. 병렬컨버터는 각각의 전력 소자에 미치는 전압/전류 스트레스의 감소, 고속도 스위칭/소프트(Soft) 스위칭 기법 적용, 컨버터의 표준화 및 규격화, 확장성, 정비성 및 고장 발생 시 전력공급의 신뢰성 등에서 장점이 있다. 그러나, 병렬컨버터에서는 부하전류가 특정 단위컨버터에 집중되지 않도록 부하전류를 분배하는 제어기능과, 임의의 단위컨버터의 고장 발생 시 나머지 단위컨버터들이 안정적으로 부하전압/전류를 공급할 수 있는 제어기능이 필요하다[1][2]. 부하전류 분담을 위한 제어루프로 인하여 병렬컨버터의 모델은 단위컨버터와 달라지게 되며, 또한 단위컨버터의 숫자가 증가함에 따라 병렬컨버터의 모델링이 복잡해지므로 이를 단순화하여 분석하는 연구가 필요하다[3].

지금까지 병렬컨버터의 부하전류분담 연구는 주로 정상상태에 대한 연구가 수행되어 왔으며 부하변화와 고장 발생을 고려한 연구는 미흡하였다. 본 연구에서는 병렬컨버터가 여유전원(Redundancy Power Supply)으로서 부하변동 또는 고장 발생 시에도 전원을 안정하게 공급할 수 있도록 단위컨버터의 응답특성을 개선토록 설계하였으며, 병렬컨버터의 모델링을 통하여 응답특성을 분석하고 병렬컨버터의 실험을 통하여 확인하고자 한다.

2. 단위 포워드컨버터의 설계

본 연구에서는 병렬컨버터를 구성하는 단위컨버터로서 포워드컨버터를 사용하였으며, 독립된 컨버터로서 동작이 가능하도록 하였다. 포워드컨버터는 병렬 구성과 독립적인 동작을 고려하여 그림 1과 같이 설계하였다. 제어기의 내부에서 루프에서는 신속한 응답특성, 전기잡음에 대한 강한 내성, 그리고 실질적인 출력전류의 평균값을 이용함으로써 병렬운용시 정확한 부하전류분담을 가능하게 할 수 있도록 평균전류모드제어(Average Current Mode Control)를 선택하였다[4]. 단위컨버터가 독립적으로 동작하는 경우에는 부하전류분담 기준신호 v_{cs} 의 값이 항상 영(零)이 되도록 설계하였다. 평균전류모드제어를 위하여 보상기 G_o 는 다음과 같이 설계하였다.

보상기 전달함수의 영점은 컨버터의 스위칭 주파수 f_s 의 1/20 이내, 2차 극점은 스위칭 주파수 f_s 의 1/2보다 높은 주파수에 위치시켰으며, 스위칭 주파수 f_s 의 1/2에서의 공진 첨두값을 상쇄토록 적분기 이득을 조정하였다. 본 연구에서는 컨버터의 스위칭 주파수 f_s 를 100kHz로 설계하였다. 따라서, 평균전류모드제어를 위한 보상기 G_o 의 영점 주파수 f_z 는 1kHz, 2차 극점 주파수 f_p 는 53kHz가 되도록 설계하였다.



$C_1: 100\mu\text{F}$, $C_2: 10\text{nF}$, $R_1: 30\text{k}\Omega$, $R_{in}: 3.3\text{k}\Omega$, $R_{11}: 47\text{k}\Omega$, $R_{12}: 47\text{k}\Omega$, $R_{13}: 564\text{k}\Omega$, $r_1: 1\sim 3\text{m}\Omega$, $C_o: 3000\mu\text{F}$, $L_o: 120\mu\text{H}$, $R_o: 1.5\sim 2.1\Omega$

그림 1. 설계된 포워드컨버터의 구성도

3. 병렬컨버터의 설계, 모델링 및 특성해석

3.1. 병렬컨버터의 제어기 설계

병렬 컨버터는 그림 2와 같이 단위컨버터로서 포워드컨버터를 n개 병렬로 구성하였다.

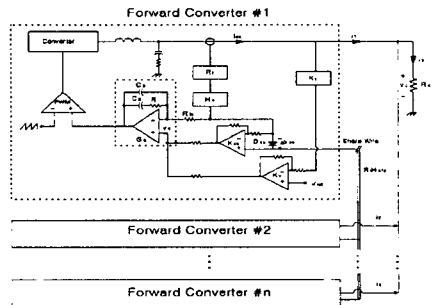


그림 2. 구성된 병렬 컨버터

각각의 포워드컨버터가 출력전압과 출력전류를 제어할 수 있는 독립적인 제어기를 보유하고 있으며 단위컨버터의 부하전류를 균등하게 배분하기 위하여 최대전류제어법(Highest Current Control Method)을 채택하였다. 최대전류제어법에서는 부하전류분담 기준신호를 전송하는 전류분담선이 모든 단위컨버터를 간단한 구조로 연결하고 있다. 이 제어법에서는 단위컨버터간 주종의

관계가 고정되어 있지 않기 때문에 주컨버터의 고장 발생 시에도 전류분담기준신호는 안정적으로 결정될 수 있어 전력공급의 신뢰도를 높일 수 있다. 본 연구에서는 전류분담 제어루프를 출력전압 제어루프와 병렬로 처리하여 제어기의 설계가 용이하도록 하였다. 출력전압 오차와 부하전류오차 증폭기의 이득은 12로 조정하였다.

3.2. 병렬컨버터의 모델링과 특성 해석

병렬컨버터의 모델링에서는 단위컨버터의 모델과 달리 부하전류분담 기준신호를 결정하고 전달하는 루프가 추가되어야 하며, 또한 병렬로 구성되는 단위컨버터의 개수가 증가됨에 따라 모델이 복잡해지기 때문에 병렬 컨버터의 특성 분석이 어려워지게 된다. 따라서, 본 연구에서는 단위컨버터 모델에 부하전류분담 신호의 결정과 전달 과정을 추가하고 단위컨버터의 등가부하저항 R_o 를 nR_o 로 처리함으로써 병렬컨버터의 모델을 간단하게 유도하였다. (여기서, R_o 부하저항, n 단위컨버터 개수)

최대전류제어법의 경우 전류분담선에 나타나는 신호는 식(1)과 같다.

$$\hat{v}_{sh} = R_i \cdot H_e(s) \cdot \hat{i}_b \quad (1)$$

여기서 \hat{v}_{sh} : 전류분담선의 전압 소신호,

\hat{i}_b : 단위컨버터중 최대 출력전류값의 소신호

부하전류분담 기준신호와 k 번째 단위컨버터의 출력전류신호 오차인 $\Delta \hat{v}_{\alpha k}$ 는 식(2)와 같이 되며 항상 영(零) 이상의 값을 갖는다. 식(2)의 2차 항은 임의의 외부 입력값으로 간주할 수 있다. 또한, 최대전류제어법에서는 전류분담신호가 단위컨버터 개수 n 의 변화에 영향을 받고 있지 않음을 식에서 확인할 수 있다.

$$\begin{aligned} \Delta \hat{v}_{\alpha k} &= R_i \cdot H_e(s) \cdot (\hat{i}_b - \hat{i}_k) \\ &= -R_i \cdot H_e(s) \cdot \hat{i}_k + R_i \cdot H_e(s) \cdot \hat{i}_b \geq 0 \end{aligned} \quad (2)$$

최대전류제어법을 사용한 병렬컨버터를 독립된 컨버터로 모델링한 블록선도는 그림3과 같다. 기존 포워드컨버터의 모델과 비교 시 부하전류분담 기준신호의 증폭이득 K_{α} 와 부하전류분담루프가 추가되어 3개의 제어루프가 있다.

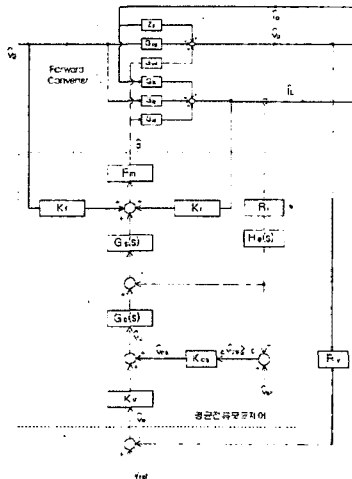


그림 3. 최대전류제어법에 의한 병렬 포워드컨버터의 소신호 블록도

그림3으로부터 얻어지는 부하전류분담 기준신호에 대한 부하전류와 출력전압 전달함수의 특성은 그림4와 그림5와 같다. 최대전류제어법에서 부하전류분담신호에 대하여 부하전류는 저주파에서는 영향이 없으나 고주파수에서는 일정한 큰 이득을 갖고 있어 신속한 부하전류분담 제어가 가능해진다. 또한, 부하전류분담 신호에 대한 출력전압은 저주파에서는 일정 크기의 이득을 갖고 있으나 고주파에서는 감쇠비가 매우 크다. 따라서, 부하전류분담 신호는 일반적으로 높은 주파수 특성을 갖고 있기 때문에 부하전류분담 신호는 부하전류분담에는 큰 역할을 하지만 출력전압에는 영향이 없음을 알 수 있다.

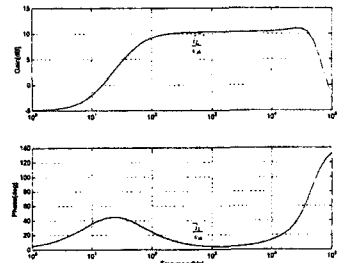


그림 4. 부하전류분담신호-인덕터 전류 전달함수 특성

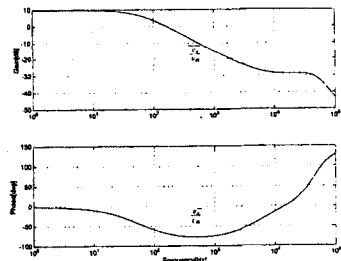


그림 5. 부하전류분담 신호-출력전압의 전달함수 특성

4. 실험 결과 및 검토

실험장치는 포워드컨버터를 3개 병렬로 구성하였다. 각각의 포워드컨버터의 스위칭주파수는 100kHz로 동작하며 전류센서는 LA55-P, 제어기는 Unitrode사 UC3907의 일부 기능을 이용하였다.

우선 부하저항이 갑작스럽게 감소하는 경우의 단위 포워드컨버터의 응답특성을 그림6과 같이 확인하였다. 안정화 시간은 약 0.1msec가 소요되었다.

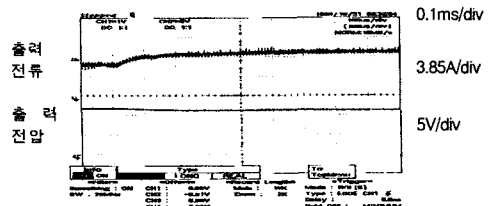


그림 6. 포워드컨버터의 부하저항 변화 응답

그림6과 같이 동작하는 포워드컨버터 3대를 병렬로 구성하여 병렬 운용시 부하전류분담 제어가 없는 경우 그림7과 같이 출력전류는 균등하게 분담되지 않음을 확인하였다. 그러나, 부하전류분담제어가 이루어 질 경우는 그림8과 같이 부하전압을 일정하게 유지하면서 각각의 단위컨버터 출력전류는 일정한 값을 기준으로 서로 교차하면서 부하전류를 균등하게 분담함을 알 수 있다.

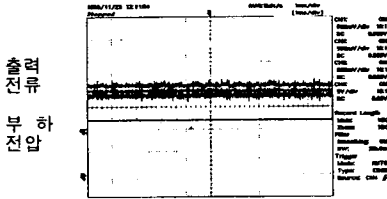


그림 7. 부하분담제어 없는 경우의 병렬컨버터의 동작

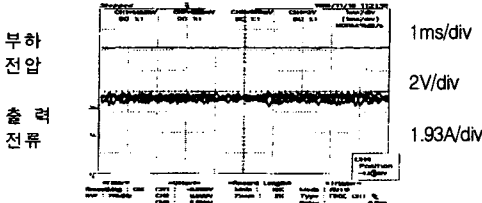
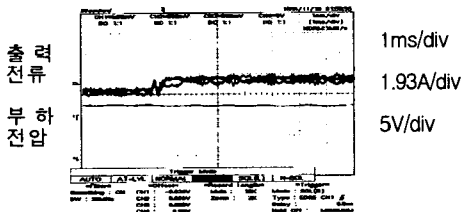
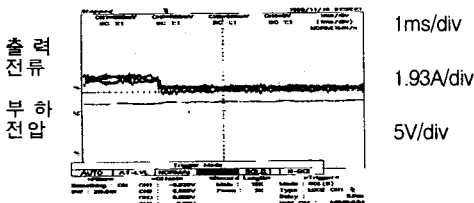


그림 8. 부하분담제어 있는 경우의 병렬컨버터의 동작

병렬컨버터가 정상상태로 동작중 부하가 급격히 변화할 때에도 병렬컨버터는 출력전압을 일정하게 유지하면서 단위컨버터간 출력전류를 균등하게 분배할 수 있어야 한다. 그림9는 부하저항을 2.1Ω에서 1.5Ω로, 1.5Ω에서 2.1Ω으로 변화시킬 때의 부하전압과 단위컨버터의 출력전류 분담을 실험한 결과이다. 부하의 계단 변화 시에도 부하전압을 일정하게 유지하면서 구성 단위컨버터 간 출력전류도 균등하게 분배됨을 확인할 수 있다. 단위컨버터의 출력전류 안정시간은 각각 500, 200μs이다.



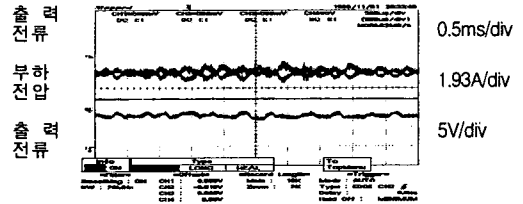
(a) 부하저항 감소 시(2.1Ω→1.5Ω)



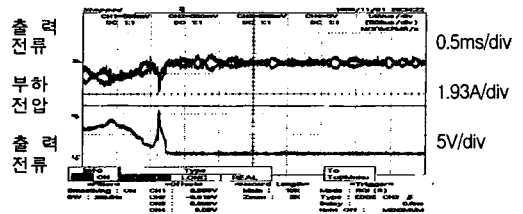
(b) 부하저항 증가 시(1.5Ω→2.1Ω)

그림 9. 부하저항 변화 시 병렬컨버터의 동작특성

병렬컨버터는 정상동작 중, 임의의 단위컨버터에 고장이 발생하는 경우에도 잔여 단위컨버터가 부하전류와 부하전압을 일정하게 유지하면서 부하전류를 균등하게 배분하여야 여유전원이라 할 수 있다. 그림10은 병렬컨버터가 여유전원으로 동작가능한를 확인하기 위해 정상 동작 중에 단위컨버터 1대의 동작을 순간적으로 기능정지 시키고, 나머지 단위컨버터 2대가 공급하는 부하전류, 부하전압 그리고 각 단위컨버터간의 출력전류분담 특성을 확인한 실험 결과이다. 1대의 단위컨버터의 고장 발생 시에도 나머지 2대의 단위컨버터가 균등하게 출력전류를 분배하면서 부하전압을 일정하게 유지함을 확인할 수 있다.



(a) 고장전



(b) 고장 발생

그림 10. 고장발생시 병렬컨버터의 동작특성

4. 결론

본 연구에서는 여유전원으로 사용되는 병렬컨버터의 동작특성을 향상시키기 위하여 단위컨버터의 제어법으로 평균전류모드제어법을 사용하였다. 병렬컨버터의 동작특성 분석을 위하여 병렬컨버터의 모델을 도출하였으며 부하전류분담 제어루프가 출력전압에는 영향을 미치지 않으면서 출력전류가 양호하게 제어됨을 보였다. 또한, 급격한 부하변화와 단위컨버터 고장 발생 조건에서 병렬컨버터가 안정하게 제어됨을 실험결과로서 제시하였다.

[참고 문헌]

- [1] Shinuo Luo, Zhihong Ye, Ray Lee Lin, and Fred C. Lee, "A Classification and Evaluation of Paralleling Methods for Power Supply Modules", IEEE PESC, 1999, pp901~908
- [2] Mark Jordan, "UC3907 Load Share IC Simplifies Parallel Power Supply Design", Unitrode Application Note U-129, pp. 9-296~9-398
- [3] Byung-Cho Choi, "A New Approach to Reduced-Order Modeling of Multi-Module Converters," Journal of Electrical Engineering and Information Science, Vol. 2, No. 4 1997, pp92~98
- [4] Wei Tang, Fred C. Lee, Raymond B. Ridley, "Small-Signal Modeling of Average Current-Mode Control," IEEE Transaction on Power Electronics, Vol. 8, No. 2, April 1993, pp. 112~119