

모듈러 구조의 전력변환 장치의 효율과 신뢰성 향상을 위한 입력 전력 균등화 제어

김민아, 정지훈
울산과학기술원

Input Power Balancing Strategy for Enhancing Power Conversion Efficiency and System Reliability of Modular Power Converters

Mina Kim, Jee-Hoon Jung

Ulsan National Institute of Science and Technology

ABSTRACT

모듈러 구조의 전력변환 장치는 고전류 및 고전력이 요구되는 어플리케이션에 사용한다. 일반적으로 모듈러 구조의 전력변환 장치는 전체 출력 전력을 각각의 단일 전력변환 장치의 출력 전력에 균등하게 분배되도록 제어하여 부하 부담을 모든 개별 전력변환 장치로 분산한다. 하지만 기존의 출력 전력 균등화 제어는 전력변환 장치 간의 전력변환 효율 차이에 대하여 능동적으로 대응할 수 없기 때문에 모듈러 구조의 전력변환 시스템의 전력변환 효율과 신뢰성을 저감할 수 있다. 본 논문에서는 개별 전력변환 장치 간의 실제적인 효율 차이를 고려하여 출력 전력이 아닌 입력 전력에 대하여 모듈러 구조로 구성된 개별 전력변환 장치의 부하를 조절하는 입력 전력 균등화 제어 방법을 제안한다. 제안하는 입력 전력 균등화 제어 방법은 2개의 200 W급 모듈러 벅 컨버터를 통해 검증하였다.

1. 서 론

모듈러 구조의 병렬 연결된 전력변환 장치는 고전류 및 고전류가 요구되는 어플리케이션에 적용되어 높은 전력변환 효율, 높은 신뢰성, 낮은 전압 및 전류 스트레스 등을 달성할 수 있다.^[1] 하지만 모듈러 구조의 전력변환 장치는 각각의 개별 전력변환 장치에 전력 부담을 균등하게 분배하기 위한 전력 제어 알고리즘이 요구된다. 일반적으로 전력변환 장치의 출력 전류를 제어하는 출력 전력 균등화 방식이 사용된다.^[2]

장기간 사용한 전력변환 장치는 능동 및 수동 소자의 노후화로 인해 새로운 전력변환 장치에 비해 전력변환 효율이 감소한다.^[3] 또한 제조 과정의 공차로 인해 동일하게 제작된 전력변환 장치 사이에도 전력변환 효율 편차가 발생할 수 있다. 모듈러 구조의 전력변환 장치에 널리 사용되는 출력 전력 균등화 기법을 사용할 경우 전력변환 장치의 효율에 관계 없이 일정한 출력 전력을 공유하기 때문에 전력변환 효율이 낮은 전력변환 장치의 전력변환 부담이 상승하게 된다. 이는 노후화된 전력변환 장치의 노후 가속화를 촉진하여 전력변환 효율을 더욱 감소시키고 모듈러 구조의 전력변환 장치의 신뢰성 및 수명을 단축시키는 문제가 발생한다.^[4]

본 논문에서는 모듈러 구조의 전력변환 장치 간 내재하는 전력변환 효율 편차를 능동적으로 보정할 수 있는 입력 전력 균등화 기법을 제안한다. 입력 전력 균등화 기법은 모듈러 구조의 개별 전력변환 장치 간의 손실을 자동으로 분배할 수 있

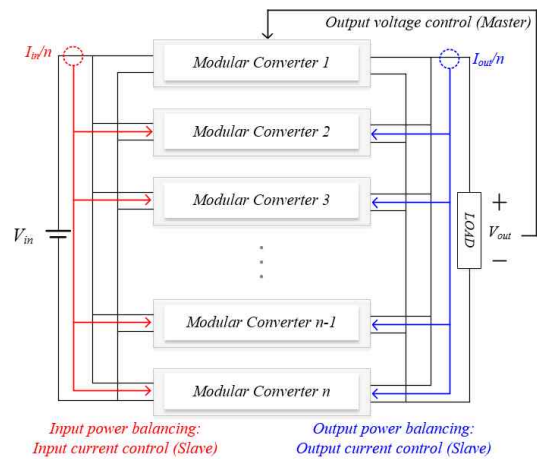


그림 1 모듈러 전력변환 장치에 적용되는 입력 전력 균등화 및 출력 전력 균등화 제어 방식 비교

어 모듈러 구조의 전력변환 시스템의 전력변환 효율과 신뢰성을 향상시킬 수 있다. 그림 1은 모듈러 구조의 전력변환 장치에 사용되는 출력 전력 균등화 기법과 입력 전력 균등화 기법을 비교하였다. 기존 출력 전력 균등화 기법은 모듈러 전력변환 장치의 출력 전압을 제어하는 Master 전력변환 장치의 출력 전력을 센싱하여 Slave 전력변환 장치의 출력 전력을 동일하게 제어한다. 제안하는 입력 전력 균등화 기법은 Master 전력변환 장치의 입력 전력을 센싱하여 Slave 전력변환 장치의 입력 전력을 동일하게 제어한다. 출력 전력 균등화 기법에 비해 제안하는 입력 전력 균등화 기법은 추가적인 센서나 복잡한 알고리즘 없이 모듈러 구조의 전력변환 장치의 성능을 향상시킬 수 있는 장점이 있다.

2. 출력 전력 균등화 및 입력 전력 균등화 기법의 비교

2.1 전력변환 효율 및 손실 분석

그림 2는 모듈러 구조의 전력변환 장치의 전력 흐름을 도표로 나타내었다. 이 때, P_i 와 P_o 는 모듈러 구조의 전력변환 장치의 전체 입력 및 출력 전력을 나타내고 P_{i1} 및 P_{o1} , n 는 i 번째 전력변환 장치의 개별 입력 및 출력 전력과 전력변환 효율을 나타낸다. 출력 전력 균등화 기법을 이용한 모듈러 전력변환 장치의 입력 및 출력 전력과 전체 전력변환 효율 및 손실을

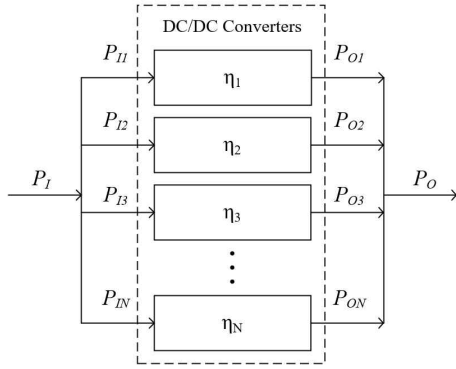


그림 2 모듈러 전력변환 장치의 개념적인 전력 흐름도

다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$P_{O1} = P_{O2} = \dots = P_{ON} = P_O \frac{1}{N} \quad (1)$$

$$P_I = \sum_{i=1}^N P_{Ii} = \sum_{i=1}^N \frac{P_{Oi}}{\eta_i} = \sum_{i=1}^N \frac{P_O}{N} \frac{1}{\eta_i} \quad (2)$$

$$\eta_{T,O} = \frac{P_O}{P_I} = P_O \frac{1}{\sum_{i=1}^N \frac{P_O}{N\eta_i}} = N \frac{1}{\sum_{i=1}^N \eta_i^{-1}} \quad (3)$$

$$P_{L,O} = P_I - P_O = \frac{P_O}{N} \left(\sum_{i=1}^N \eta_i^{-1} - N \right) \quad (4)$$

이 때, N 은 병렬 연결된 개별 전력변환 장치의 개수를 나타낸다.

입력 전력 균등화 기법을 이용한 모듈러 전력변환 장치의 입력 및 출력 전력과 전체 전력변환 효율 및 손실을 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$P_{I1} = P_{I2} = \dots = P_{IN} = P_I \frac{1}{N} \quad (5)$$

$$P_O = \sum_{i=1}^N P_{O\alpha} = \frac{P_I}{N} \sum_{i=1}^N \eta_i = \frac{\sum_{i=1}^N \eta_i}{N} P_I \quad (6)$$

$$\eta_{T,I} = \frac{P_O}{P_I} = \frac{P_I}{N} \frac{\sum_{i=1}^N \eta_i}{P_I} = \frac{\sum_{i=1}^N \eta_i}{N} \quad (7)$$

$$P_{L,I} = P_I - P_O = \frac{P_I}{N} \left(N - \sum_{i=1}^N \eta_i \right) \quad (8)$$

2.2 균등화 기법에 따른 성능 비교

본 절에서는 두 개의 모듈러 전력변환 장치 예를 통해 입력 전력 균등화와 출력 전력 균등화의 전체 전력변환 효율과 전력변환 손실 편차를 비교한다. 모듈러 전력변환 장치에 입력 전력 균등화와 출력 전력 균등화를 사용하였을 때 전체 전력변환 효율 차이 ($\eta_{T,I} - \eta_{T,O}$)를 그림 3에 나타내었다. 두 개의 전력변환 장치가 동일한 전력 변환 효율을 가질 때 입력 전력 균등화와 출력 전력 균등화 기법의 전력변환 효율이 동일하다. 노후화 및 제작 공정에 의한 전력변환 장치의 전력변환 효율 편차를 고려하면 입력 전력 균등화 기법이 출력 전력 균등화 기법에 비해 높은 전력변환 효율을 갖는다. 각각의 개별 전력변환 장치의 효율 차이가 커질수록 제한하는 입력 전력 균등화 기법이 기존의 출력 전력 균등화 기법에 비해 효율이 높고 그 편차가 커진다.

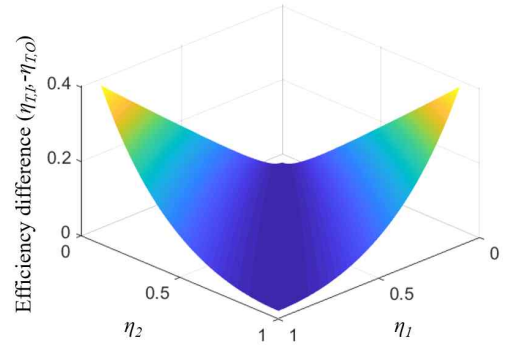
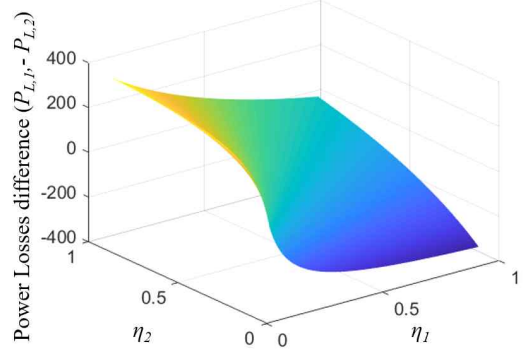
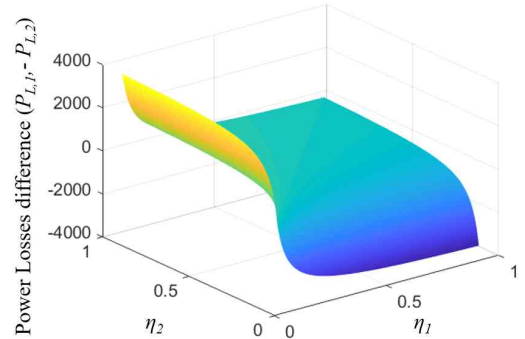


그림 3 모듈러 전력변환 장치의 입력 전력 균등화와 출력 전력 균등화 사용 시 전력변환 효율 차이 ($\eta_{T,I} - \eta_{T,O}$)



(a) 입력 전력 균등화 사용 시 전력변환 장치 간 손실 편차



(b) 출력 전력 균등화 사용 시 전력변환 장치 간 손실 편차

그림 4 모듈러 전력변환 장치의 입력 전력 균등화와 출력 전력 균등화에 대한 장치 간 전력변환 손실 편차

그림 4는 모듈러 전력변환 장치에 입력 전력 균등화와 출력 전력 균등화를 적용할 때 전력변환 장치 간 손실 편차를 나타내었다. 두 개의 전력변환 장치의 효율 편차가 존재하면 전력변환 장치 간 손실 편차가 발생한다. 하지만 입력 전력 균등화 기법은 출력 전력 균등화 기법에 비해 전력변환 장치 간 손실 편차를 크게 줄일 수 있다. 이론적으로 입력 전력 균등화 기법은 모듈러 전력변환 장치의 성능 편차가 발생하였을 때 전체 전력변환 효율을 향상시킬 수 있고 개별 전력변환 장치 간 손실 편차를 줄일 수 있다. 이는 모듈러 전력변환 장치의 성능과 신뢰성을 향상시키는 동시에 성능이 낮은 전력변환 장치의 전력변환 가동율을 줄여서 노후 가속화를 저감하고 장치의 수명을 늘릴 수 있다.

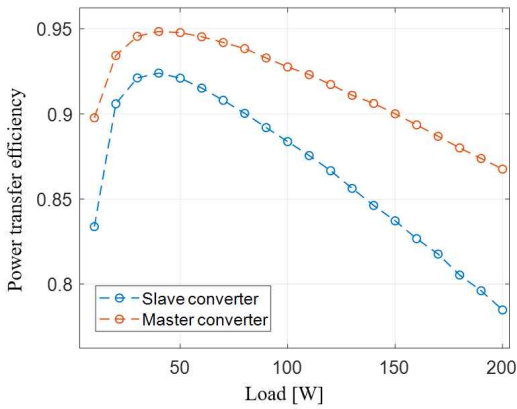


그림 5 200 W 급 Buck 컨버터 시제품의 전력변환 효율

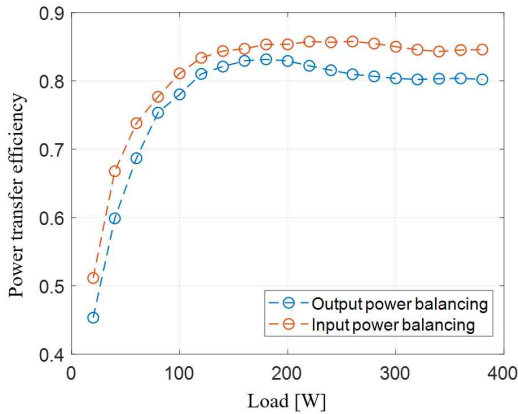


그림 6 전력균등화 기법에 따른 모듈러 Buck 컨버터의 전력 변환 효율

3. 실험 결과

그림 5는 실험에 사용된 200 W급 Buck 컨버터의 전력변환 효율을 나타내었다. 컨버터 간 노후화 및 제조 공정 오차로 인한 효율 편차를 모사하기 위하여 Slave 전력변환 장치에 추가 저항을 사용하였다. 그림 6은 380 W급 모듈러 Buck 컨버터의 전력 균등화 기법에 따른 전력변환 효율을 나타낸다. 출력 전력 균등화 기법에 비해 입력 전력 균등화 기법을 사용하였을 때 전 부하 영역에서 전력변환 효율을 향상시킬 수 있다.

표 1은 전력 균등화 기법에 따른 모듈러 Buck 컨버터의 전력변환 효율, 전력변환 손실, 손실 편차, 능동 소자의 최대 동작 온도를 정량적으로 비교하였다. 2.2절에 나타난 분석 결과와 같이 정상 상태에서 입력 전력 균등화 기법은 출력 전력 균등화 기법에 비해 전력 변환 효율뿐만 아니라 전력변환 장치 간 손실 편차를 줄일 수 있다. 또한 출력 전력 균등화 기법은 전력변환 장치 간 손실 편차를 증가시키기 때문에 전력변환 효율이 낮은 컨버터의 동작 온도를 증가시킨다. 그에 반해 입력 전력 균등화 기법은 출력 전력 균등화 기법에 비해 전력변환 장치 간 손실 편차를 줄임으로써 컨버터의 최대 동작 온도를 낮추고 컨버터 간 동작 온도 또한 균등화시킬 수 있다.

4. 결론

표 1 전력 균등화 기법에 따른 성능 비교

Table 1 Comparison of performance between input power balancing and output power balancing methods

	입력 전력 균등화	출력 전력 균등화
전력변환 효율	84.39%	80.19%
전력변환 손실 ($P_{L,Master}$)	19.20 W	26.45 W
전력변환 손실 ($P_{L,Slave}$)	48.22 W	64.25 W
전력변환 손실편차 ($P_{L,Master} - P_{L,Slave}$)	29.02 W	37.80 W
능동 소자의 최대 동작 온도	64.04 °C	78.06 °C

본 논문에서는 모듈러 구조의 전력변환 장치의 노후화 및 제작 공정 오차에 의한 성능 편차를 고려하여 모듈러 전력변환 장치의 전력변환 효율, 신뢰성, 및 전력변환 장치 간 손실 편차를 향상시키기 위한 입력 전력 균등화 방식이 제안되었다. 제안하는 입력 전력 균등화 기법은 기존의 출력 전력 균등화에 비해 이론적으로 전력변환 효율, 컨버터 간 손실 편차를 줄일 수 있다. 또한 입력 전력 균등화 기법은 컨버터 간 효율 편차가 존재할 때 컨버터 간 손실 편차를 줄여 최대 동작 온도를 줄일 수 있다. 200 W급 2개의 모듈러 Buck 컨버터를 통해 실험적으로 검증한 바, 제안하는 기법을 사용 시 전력변환 효율은 4% 이상 향상되었고 *** 부품의 최대 동작 온도도 14 °C 이상 줄일 수 있었다.

이 논문은 2019년도 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단의 지원에 의하여 연구되었음.
(NRF-2019R1A2B5B01069665)

참고 문헌

- [1] S. N. Manias and G. Kostakis, "Modular DC-DC convertor for high-output voltage applications," in *IEE Proceedings B - Electric Power Applications*, vol. 140, no. 2, pp. 97-102, March 1993.
- [2] W. Chen, X. Ruan, H. Yan and C. K. Tse, "DC/DC Conversion Systems Consisting of Multiple Converter Modules: Stability, Control, and Experimental Verifications," in *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 24, no. 6, pp. 1463-1474, June 2009.
- [3] M. S. Nasrin and F. H. Khan, "Characterization of aging process in power converters using spread spectrum time domain reflectometry," *2012 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE)*, Raleigh, NC, 2012, pp. 2142-2148.
- [4] M. Liserre, M. Andresen, L. Costa and G. Buticchi, "Power Routing in Modular Smart Transformers: Active Thermal Control Through Uneven Loading of Cells," in *IEEE Industrial Electronics Magazine*, vol. 10, no. 3, pp. 43-53, Sept. 2016.