스위칭 주파수 분석을 이용한 병렬 양방향 DC-DC 컨버터의 전류분배 제어방법

채수용, 박진주, 백종복
한국에너지기술연구원

Current sharing method for parallel bidirectional dc-dc converters using the switching frequency analysis

Suyong Chae, Jinju Park, Jongbok Baek
Korea Institute of Energy Research

ABSTRACT

본 논문은 스위칭 주파수 스펙트럼 분석에 기반한 모듈형 병렬 양방향 DC-DC 컨버터의 전류분배 제어방법을 제안한다. 병렬 DC-DC 컨버터 각 모듈의 전류분배 균일도 향상은 동작 안정성 확보, 효율 및 신뢰성 향상을 위해 매우 중요한 요소이다. 드룹 제어의 적용을 통해 별도의 통신연결 없이 각 병렬 모듈간 전류 분배량 제어가 가능하지만, 선로 저항의 차이나 측정 소자의 편차가 발생할 경우 각 모듈간 균일한 전류분배가 어려운 문제가 존재한다. 각 모듈간 전류분배를 위해 각 개별 모듈의 입력 전류에 존재하는 스위칭 주파수 성분만을 분석하여 병렬 모듈 사이의 전류분배 차이를 검출하고, 그 차이를 최소화 하도록 드룹 이득을 단계적으로 조절하는 제어 알고리즘을 제안한다. 제안된 제어 알고리즘은 에너지 저장장치와 연계된 380V급 DC 배전 시스템 모델을 대상으로 검증하였다.

1. 서론

배터리, 연료전지, 태양광 등 분산 에너지원의 종류와 적용 대상이 증가함에 따라 규격화된 전력변환 모듈의 병렬 구성을 통한 용량 가변성 대응 관련 기술 개발이 활발히 시도되고 있다. 전력변환 모듈의 병렬 구성은 분산 에너지원의 전력처리 용량을 비교적 손쉽게 증가시킬 수 있고, 여유 중복 회로의 구성을 통해 시스템 신뢰성을 향상시킬 수 있는 장점이 있다. 하지만, 전력변환 모듈간의 전력 처리량에 불균형이 발생하게 되면 일부 모듈의 분담 부하 증가로 인해 비대칭적 노화 현상이 발생하게 되며 이는 전체 시스템의 신뢰도를 저하시키게 된다. 또한, 운전 중 입출력 리플 성분의 증가, 효율 감소 현상과 같은 단점이 발생하게 된다[1].

기존 병렬 전력변환 모듈의 모듈간 전류제어 방법은 마스터 제어기를 이용한 중앙제어 방식과, 드룹 제어기를 이용한 분산제어 방식으로 크게 분류할 수 있다. 중앙제어 방식은 마스터 제어기에서 각 모듈의 전류 지령값을 생성하여 전달하는 방식을 주로 이용한다. 이러한 방식은 직관적 시스템 구현이 가능한 장점이 있지만 전류 지령값 전달 경로에 문제가 발생할 경우 각 모듈간 정상적 전류 분배가 중단되며, 동작 모듈의 개수에 따라 시스템 제어회로의 특성 변경을 통한 최적화가 필요한 단점이 존재한다.

대표적 분산제어 방식으로 각 개별 모듈의 출력전류의 크기에 따라 출력전압을 변경하는 드룹 제어방식은 중앙 제어기의 적용 없이 각 개별 모듈별로 전류 분배가 가능한 장점이 존재한다. 하지만, 각 모듈의 선로 임피던스에 차이가 발생할 경우 모듈간 드룹 특성에 편차가 발생하게 되어 균일한 전류 분배가 어렵게 된다. 병렬 모듈간 균일한 전류 분배를 위해 통신을 이용한 다양한 전류분배 방법이 제안되고 있지만, 이러한 통신에 의존하는 방법은 분산제어 방법의 장점인 유연성 및 확장성을 제한하게 된다.

본 논문에서는 통신연결 없이 각 병렬 모듈의 전류 분배 균일도를 향상 시킬 수 있는 드룹 제어 기반 병렬운전 알고리즘을 제안한다. 입력 에너지원과 출력을 공유하는 각 개별 전력변환 모듈은 개별 출력 전류에 따라 스위칭 주파수를 일정 범위 내에서 가변 운전하게 되며, 개별 입력전류에 존재하는 스위칭 주파수 성분에 대한 주파수 스펙트럼 분석을 통해 전체 모듈의 전류분배 균일도을 검출하게 된다. 균일도 검출 결과에 따라 각 개별 모듈의 드룹 이득을 조절하여 전류 분배 균일도를 향상시키는 알고리즘을 제안하고자 한다.

2. 병렬 전류분배 제어

2.1 병렬 양방향 DC/DC 컨버터 구성

그림 1은 본 논문에 적용된 두 개의 양방향 동기형 벅-부스트 컨버터 모듈로 구현된 병렬형 전력변환장치의 구성도를 나타낸다. 병렬형 전력변환장치는 200V급 에너지저장장치와 380V급 저전압 DC 배전계통 사이에 위치한다. 전력변환장치는 계통에 필요 전력을 공급하거나, 잉여 전력을 배터리에 충전하는 동작을 수행한다. 각 개별 양방향 컨버터 모듈은 디지털 전류제어기와 전압제어기를 이용하여 제어된다. 두 모듈의 병렬 운전을 위해 개별 모듈의 계통측 출력 전류의 크기에 비례하여 전압제어기의 기준값을 변경하는 드룹 제어기를 적용하였다. 하지만, 연결 경로에 존재하는 저항 성분(r_1, r_2)간 차이가 발생하게 되면 모듈간 드룹 특성에 차이가 발생하여 모듈간 분배전류 크기가 다르게 된다.

각 개별 모듈의 스위칭 주기는 일정 범위 내에서 계통측 출력 전류의 크기에 따라 비례하여 변화하도록 하였다. 따라서 각 모듈간 분배 전류에 차이가 발생하게 되면 입력전류의 주파수 성분에 두 개의 첨두치가 나타나게 되며, 분배 전류가 동일할 경우 하나의 첨두치만 나타나게 된다. 또한, 분배 전류의 차이가 커질수록 두 첨두치 사이의 거리는 증가하게 된다. 각 개별 모듈별로 입력전류(i_{in1}, i_{in2})에 대한 주파수 영역 히스토그램

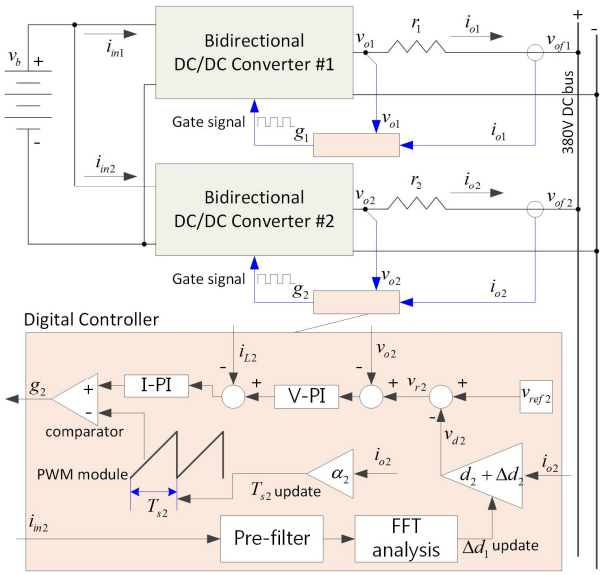

그림 1 양방향 병렬 DC/DC 컨버터 구성도

Fig. 1 Bidirectional parallel DC/DC converter diagram

분석을 통해 분배 전류의 차이를 검출하게 되며, 차이가 발생할 경우 드룹 이득을 미세 조절하여 전류 분배가 최소화 되도록 한다. 각 모듈의 개별 입력전류 성분만을 이용하기 때문에 모듈간 통신을 이용한 별도의 전류정보 교환은 필요하지 않게 된다.

2.2 전류분배 알고리즘

제안하는 전류분배 알고리즘은 각 모듈의 개별 입력전류 $i_{in}(t)$의 주파수 스펙트럼 정보를 이용한다. 전류 $i_{in}(t)$를 T_{sf} 간격으로 샘플링 한 신호인 i_{in}(n)에서 스위칭 주파수 영역에 존재하는 성분, i_{in_f}(n), 은 대역통과 특성의 pre-filter, $f(x)$,를 적용하여 수식 (1)과 같이 표현된다.

$$i_{in_f}(n) = \frac{1}{M}\sum_{m=0}^{M-1} f(m) i_{in}(n-m) \qquad (1)$$

N개의 i_{in_f}(n) 샘플에 대해 Discrete Fourier transform(DFT)를 수행한 결과는 $I_f(u)$이고, 컨버터 스위칭 주파수가 u_a과 u_b 사이에 존재할 때 주파수 히스토그램 평균과 표준편차는 다음과 같이 정의된다..

$$\mu_f = \frac{\sum_{k=a}^{b}\left(\left|I_f(u_k)\right| u_k\right)}{\sum_{k=a}^{b}\left|I_f(u_k)\right|} \qquad (2)$$

$$\sigma_f = \sqrt{\frac{\sum_{k=a}^{b}\left|I_f(u_k)\right|(u_k-\mu_f)^2}{\sum_{k=a}^{b}\left|I_f(u_k)\right|}} \qquad (3)$$

개별 모듈의 스위칭 주파수가 평균(μ_f)과 같지 않을 경우 드룹 이득을 미세 조절하게 되며, 드룹 이득은 표준편차(σ_f)가 최소값을 보일 때까지 P&O(Perturb & Observation) 방식으로 조절된다. 표준편차는 모듈간 분배전류가 동일할 때 최소화 되며, 전류분배 균일도를 나타내는 지표로 이용된다.

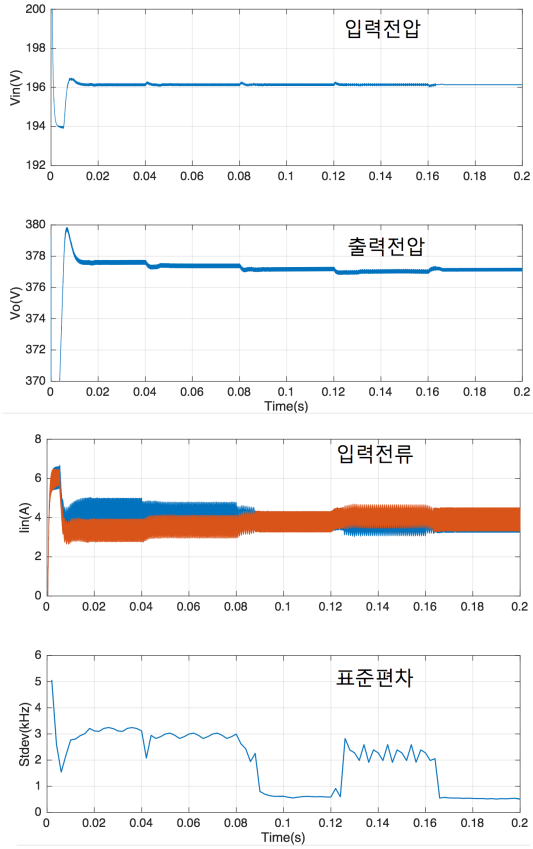

그림 2 Simulink 모의실험 결과

Fig. 2 Simulink simulation results

3. 실험결과

에너지 저장장치에서 1.6kW의 전력이 배전계통으로 공급되는 경우에 대한 Simulink 모의실험 결과는 그림 2와 같다. 선로저항의 차이로 인해 각 모듈의 입력전류는 초기에 차이가 발생하지만, 제안한 전류분배 알고리즘을 적용하여 표준편차의 크기가 최소화 되도록 40ms 간격으로 드룹 이득을 변화시키게 되면 160ms 이후에는 표준편차가 최소화 되면서 두 모듈간 전류가 일정하게 분배됨을 알 수 있다.

4. 결론

본 논문은 각 개별 모듈의 입력전류에 대한 주파수 스펙트럼 성분만을 통계적으로 분석하여 전체 모듈간 전류분배 차이를 검출하고, 그 차이가 최소화 되도록 개별 모듈의 드룹 이득을 P&O 방식으로 조절하는 알고리즘을 제안하였다.

본 연구는 한국에너지기술연구원의 주요사업으로 수행한 결과입니다(B6-2491)

참 고 문 헌

[1] S. Chae et al., "Digital Current Sharing Method for Parallel Interleaved DC-DC Converters Using Input Ripple Voltage," *IEEE Trans. Industrial Informat.*, Vol. 8, No. 3, pp. 536-544, Aug 2012.