3상 전력변환장치의 병렬운전을 위한 연구

황순상, 정호철, 윤병철, 김학원*
동아일렉콤, 한국교통대학교*

A Study on Parallel Operation of 3 Phase Power Converter

Soon Sang Hwang, Ho Chul Jung, Byung Chul Yoon, Hag Wone Kim*
Dongah elecomm, Korea National University of Transportation*

ABSTRACT

일반적으로 전력변환 장치의 용량증대 및 신뢰성 향상 위한 방안으로 병렬운전을 실시한다. 하지만, 전력변환장치 간의 전력 불평형과 순환전류의 문제점을 해결해야만 한다. 본 논문에서는 전력변환 장치 간의 전력 불평형을 억제하기 위한 커플링된 멀티인덕터를 적용한 전력변환장치의 병렬운전을 제안 한다.

1. 서론

3상 PWM 정류기 또는 인버터는 통신용 직류전원장치, UPS, 인버터, 모터 드라이브, 충전기, 태양광 발전 등 여러 응용분야에서 많이 응용되고 있다. 최근 전력변환 장치는, 용량증대 및 신뢰성 향상에 대한 요구가 증대되고 있으며, 이에 따라 전력변환장치의 용량증대 및 신뢰성 확보를 위한 방안으로 병렬운전에 대한 여러 가지 방법들이 연구 되고 있다. 3상 PWM 정류기의 병렬운전은 장치의 신뢰성 향상 및 용량을 증대시키지만 순환전류에 의한 효율 감소 및 소자들의 편차에 의해 불평형이 발생하는 문제점을 가지고 있다.[1]

한편, 전력변환 장치의 병렬운전을 하기 위해 동일 입·출력의 병렬구조 방식[2][3], Interleave의 병렬구조 방식[4][5] 등 많은 방법들이 제안 되었지만, 제안된 방법들은 능·수동 소자의 편차에 의해 발생되는 전력 불평형를 억제하기 위한 제어가 매우 복잡하다.[6]

본 논문에서는 PWM 정류기 동기화 병렬운전에서 전력 불평형를 억제하기 위한 방법으로 커플링된 멀티인덕터를 적용한 간단한 방법을 제안하고, 그 제안한 방법을 실험으로 검증한다.

2. 3상 PFC의 병렬운전

2.1 3상 PFC의 병렬 구조

기존의 3상 PWM 정류기의 병렬운전 시스템을 그림 1에 나타내었다. 기존의 3상 PWM Interleave 방식은 서로 상보적으로 운전되어 스위칭 주파수가 2배가 되는 효가가 있으나, 각 PWM 정류기의 스위칭 시점이 일치하지 않아 순환 전류가 발생할 수 있으며, 또한 독립적인 인덕터를 사용함에 따른 인덕턴스 편차에 의한 전력 불평형과 공간 활용의 문제점을 내재하고 있다. 이로 인하여 전력 불평형을 억제하기위한 제어기를 사용하거나, 두 개의 PWM 정류기를 동기화시켜 운전하는 방법을 사용한다. 그러나 전력 불평형 억제를 위한 제어기는 설계가 복잡한 단점이 있으며, 동기화 운전 방법은 병렬 회로간 불평형 문제로 순환 전류 가능성을 여전히 가지고 있다.

또 다른 병렬 운전 방법으로 그림 1과 같은 PWM 정류기 병렬구조에서 두 개의 병렬 3상 PWM 정류기를 동기화함으로 전력 불평형을 최소화 할 수 있으나, 수동 소자의 인덕터의 임피던스의 편차가 발생하면 전력 불평형이 발생될 수 있는 문제점을 가지고 있다.

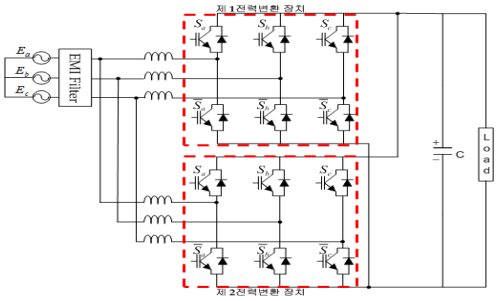


그림 1 기존의 3상 PWM 정류기의 병렬 운전

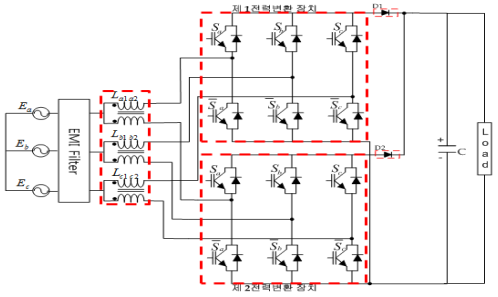


그림 2 제안된 커플링된 멀티인덕터를 사용한 3상 PWM 정류기의 병렬 운전

본 논문에서 제안된 커플링된 멀티인덕터와 다이오드를 이용하여 전력불평형 및 순환전류를 억제하는 방법을 제안한다. 제안된 커플링된 멀티인덕터를 사용한 회로는 그림 2와 같다.

2.2 병렬 3상 PFC의 평균 등가 모델

그림 3은 제안된 커플링된 멀티 인덕터를 적용한 병렬 3상 PFC의 평균 등가 모델 블록도 이다.

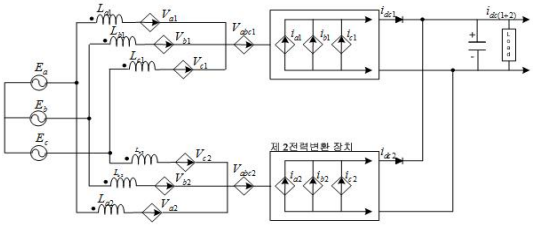
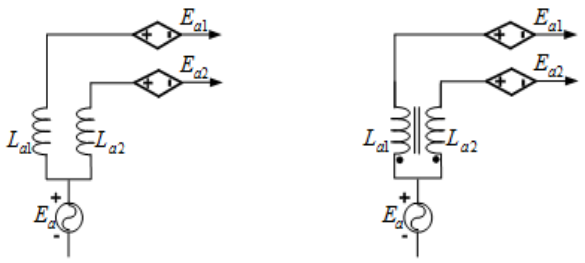


그림 3 3상 PFC 병렬운전의 평균 등가 모델 블록도



(a) 일반 인덕터를 적용한 방식 (b)커플링된 인덕터를 적용한 방식

그림 4 일반 인덕터를 적용한 방식과 제안한 커플링된 멀티 인덕터를 적용한 방식 비교

그림 4는 기존의 방법과 제안된 방법의 전력불평형의 원인이되는 입력단을 중심으로 A상만 불평형이 발생되고 B,C상은 불평형이 없는 경우로 가정하여 A상의 입력 단을 나타낸 그림이다. 그림 4(a)는 기존 방식인 개별 인덕터를 사용한 방법을, 그림 4(b)는 본 논문에서 제안된 커플링된 멀티 인덕터와 다이오드를 사용한 방법이다. 전력 불평형의 원인은 A상 입력 임피던스의 불평형 게이트 구동 신호의 불평형이라고 보고 입력단에 키르히호프의 전압 법칙을 적용하면 기존의 방식에 대한 입력단 간의 전압 방정식은 아래의 식 (1)과 같다.

$$L_{a1}\frac{di_{a1}}{dt}+R_{a1}i_{a1}-L_{a2}\frac{di_{a2}}{dt}-R_{a2}i_{a2}+(d_{a1}-d_{a2})V_{dc}=0 \quad (1)$$

여기서 아래첨자 1은 제1전력변환 장치를, 아래첨자 2는 제2의 전력변환 장치를 나타내었으며, 두 전력변환 장치 간의 영전압 항은 a상의 듀티 차이에 흡수될 수 있다고 가정하였다 . 식(1)을 라플라스변환면 제2전력변환장치의 입력 전류는 아래의 식으로 나타낼 수 있다.

$$I_{a2}(s)=\frac{sL_{a1}+R_{a1}}{sL_{a2}+R_{a2}}I_{a1}(s)+\frac{\Delta d_a}{sL_{a2}+R_{a2}}V_{dc} \quad (2)$$

식 (2)에서 병렬 운전되는 전력 변환장치가 동기화가 되면 식(2)의 두 번째 항은 0이된다. 그러나 제1 및 제2 전력변환 장치의 임피던스 오차는 전류 편차를 가져올 수 있다. 반면 제안된 방식의 경우 병렬 운전되는 전력변환 장치 간 전압 방정식은 아래의 식과 같다.

$$L_a\frac{di_{a1}}{dt}+M\frac{di_{a2}}{dt}+R_a i_{a1}-L_a\frac{di_{a2}}{dt}-M\frac{di_{a1}}{dt}-R_a i_{a2} \quad (3)$$
$$+(d_{a1}-d_{a2})V_{dc}=0$$

여기서, 커플링된 멀티 인덕터이므로 인덕턴스와 저항오차는 없다고 가정하였다. 식(3)을 라플라스변환하여 나타내면 아래의 식과 같다.

$$I_{a2}(s)=\frac{s(L_a-M)+R_a}{s(L_a-M)+R_a}I_{a1}(s)+\frac{\Delta d_a}{s(L_a-M)+R_a}V_{dc} \quad (4)$$

식 (4)에서 알 수 있는 바와 같이, 병렬 운전되는 전력 변환 장치가 동기화되면 제2전력변환 장치의 전류는 제1전력 전력변환 장치와 동일한 전류가 흐르게된다. 다만, 듀티 오차가 있는 경우 기존 방식보다 제안한 방식은 상대적으로 더 큰 불평형의 영향을 받게 되므로 동기화 운전을 하지 않을 경우는 순환 전류가 더 크게 발생할 수 있으며, 이에따라 커먼모드 초크 등을 추가할 필요가 있다.

3. 실험 결과

제안한 커플링된 멀티인덕터와 다이오드를 적용한 방법을 검증하기 위해 실험을 하였다. 표 1은 3상 PFC의 실험 조건이며, 그림 3은 커플링된 멀티 인덕터 구간에서 측정한 입력 전류 I_{a1}, I_{a2}이며, I_{b1}, I_{b2}, I_{c1}, I_{c2}도 동일한 결과를 확인 할 수 있었다. 실험 결과를 보면 알 수 있듯이 커플링된 멀티 인덕터를 사용 할 경우 제 1전력변환 장치의 구간과, 제 2전력변환 장치의 구간에 동일한 전류가 분배 되는 것을 확인 할 수 있다.

표 1 커플링된 멀티 인덕터와 다이오드를 적용한 3상 PFC 병렬운전 실험 조건

Input	상전압	380V±20%
	상전류	12A
Output	전압	680V
	전류	12A
스위칭 주파수		17kHz
효율		97.5%
역률		0.999

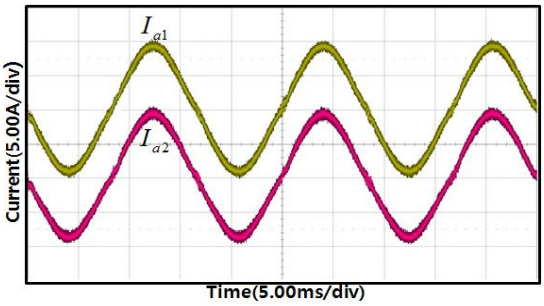


그림 5 제안한 방식을 적용한 3상 PFC 병렬운전에서의 입력 전류

4. 결 론

본 논문에서는 커플링된 멀티인덕터를 적용한 전력변환 장치의 3상 PFC 병렬운전을 제안 하였다. 기존의 전력변환 장치의 3상 PFC 병렬운전은 입력 인덕터의 편차에 의해 불평형이 발생하며, 순환전류 문제점을 가지고 있다. 문제점을 해결하기 위해 전력변환 장치 3상 PFC에 커플링된 멀티 인덕터와 다이오드를 적용하여, 병렬운전을 한 결과 효율 증가 및 상간 불평형이 최소화 되는 것을 검증 하였다.

참 고 문 헌

[1] Z. Ye, D. Boroyevich, J. Y. Choi, F. C. Lee, "Control of Circulating current in two parallel three phase boost rectifiers," IEEE Trans. on Power Electronics, vol. 17, no. 5, 2002, Sept.

[2] Yang Chen and Keyue Ma Smedley "One Cycle Controlled Three Phase Grid Connected Inverters and Their Parralel Operation", IEEE Trans. on Ind. App., vol. 44, no. 2, MAR. 2008

[3] Ching Tsai Pan, Yi Hung Liao "Modeling and Coordinate Control of Circulating Currents in Parallel Three Phase Boost Rectifiers", IEEE Trans. on IND. ELEC., vol. 54, no .2, Apr. 2007

[4] Kun Xing, Fred C. Lee, Zhihong Ye, Sudip Mazumder "Interleaved PWM with Discontinuous Space Vector Modulation", IEEE Trans. on Pow. Elec., vol. 14, no. 5, Sept. 1999

[5] 임창순, 이귀준, 김래영, 현동석 "병렬 Interleaved 컨버터에서 일반화된 순환전류 제어 방법", 전력전자학회, 전력전자학회 2010년도 전력전자학술대회 논문집 2010.7, pp. 470 471

[6] Tsung Po Chen "Zero Sequence Circulating Current Reduction Method for Parrallel HEPWM Inverters Between AC Bus and DC Bus", IEEE Trans. on Ind. Elec., vol. 59, no.1, Jan. 2012