

병렬 Interleaved 컨버터에서 일반화된 순환전류 제어 방법

임창순, 이귀준, 김래영, 현동석
한양대학교

Analytical Approach of Circulating Current Mitigation Effect using Coupled Inductor in Parallel Interleaved Converters

Chang-Soon Lim, Kui-Jun Lee, Rae-Young Kim, Dong-Seok Hyun
Hanyang University

ABSTRACT

In this paper, the coupled inductor with three branches in two interleaved converter are analyzed to effectively suppress the high frequency circulating current since the circulating current controller cannot mitigate the high frequency circulating current. As a result, the novel averaged model including the coupled inductor with zero sequence components is developed for reducing the low and high frequency circulating current simultaneously .

1. 서론

병렬 삼상 컨버터는 높은 파워, 모듈성, 높은 효율성등 많은 장점을 가지고 있어, 여러 응용 시스템에 사용되고 있다. 그러나 입력 AC단과 출력 DC단이 바로 병렬시스템에 연결된 경우 스위칭 주파수(듀티비), 과마터의 불일치등으로 인해 순환전류가 발생하게 되는데, 이러한 순환전류를 저감시키는 방법이 병렬 삼상 컨버터에서 가장 중요하다. 순환전류를 저감시키는 가장 간단한 방법으로는 변압기나 분리된 입력 AC단을 이용하여 순환전류의 경로를 차단하는 방법이다. 그러나 이러한 방법은 전체시스템의 비용, 부피, 무게등을 증가시키기 때문에 좋은 방법이 아니다. 대안으로서 하드웨어가 추가되지 않은 여러 순환 전류 제어법이 제안되었다^[1]. 그러나, 전류리플을 줄이기 위한 병렬 Interleaved 컨버터에서는 고주파수를 갖는 순환전류가 발생하게 되는데, 이러한 고주파수 순환전류는 순환전류 제어기로 저감시킬 수 없다.

그림 1과 같이, 고주파수 순환전류를 줄이기 위해서 AC단에 결합 인덕터가 추가된 병렬시스템이 제안되었지만, 단지 결합 인덕터가 순환전류에 미치는 영향을 분석하였다^[2]. 하지만, 실제 결합 인덕터는 순환전류와 상전류에 각각 영향을 미치기 때문에, 이에 대한 해석적인 접근이 요구된다.

따라서, 이 논문에서는 결합 인덕터의 해석적 접근을 통해, 결합 인덕터가 순환전류와 상전류에 미치는 영향을 분석하고, 이를 통해 저주파수와 고주파수 순환전류를 동시에 저감시킬 수 있는 새로운 모델을 제안하였다.

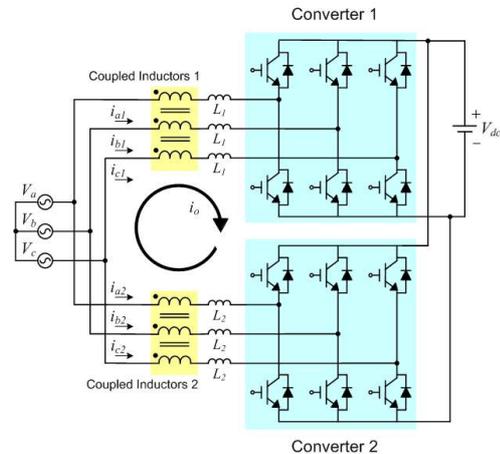


그림 1 결합 인덕터를 포함한 병렬 Interleaved 컨버터 시스템
Fig. 1 Parallel Interleaved converters system with the coupled inductor

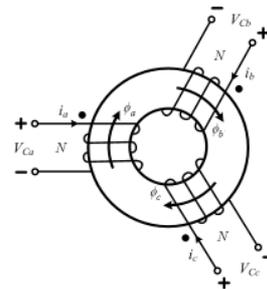


그림 2 순환전류를 위한 결합 인덕터 구조
Fig. 2 Three-winding integrated magnetic device with reference directions of currents

2. 결합 인덕터 분석

그림 2는 순환전류를 저감시키기 위한 결합 인덕터 구조이다. ϕ_x 는 코일 x 에 흐르는 전류 i_x 에 의해 생긴 총 자속을 나타낸다. 삼상의 전류가 흐르는 결합 인덕터의 방정식은 총 세 개의 식이 존재하지만, a 상에 대해서만 표현하겠다.

$$V_{Ca} = L_{aa} \frac{d}{dt} i_a + L_{ab} \frac{d}{dt} i_b + L_{ac} \frac{d}{dt} i_c \quad (1)$$

L_{aa} 은 코일 a 에 흐르는 전류에 의해 생긴 자기인덕턴스(Self Inductance), L_{ab} , L_{ac} 은 각각 코일 b , c 에 흐르는 전류에 의해 생긴 상호 인덕턴스(Mutual Inductance)를 나타낸다. 자기 인덕턴스와 상호인덕턴스는 다음과 같이 가정할 수 있다.

$$L_s = L_{aa} = L_{bb} = L_{cc} \quad (2)$$

$$L_m = L_{ab} = L_{ac} = L_{ba} = L_{bc} = L_{ca} = L_{cb} \quad (3)$$

그러므로, 자기 인덕턴스와 상호 인덕턴스 사이에 관계는 다음과 같이 표현 할 수 있다.

$$L_m = k_c \sqrt{L_s L_s} = k_c L_s \quad (4)$$

k_c 는 결합 인덕터의 결합 계수이다. 순환전류의 정의는 다음과 같다.

$$i_0 = i_a + i_b + i_c \quad (5)$$

(2)-(5)을 이용하면 (1)의 결합 인덕터의 방정식을 다음과 같이 다르게 표현 할 수 있다.

$$V_{Ca} = L_s(1 - k_c) \frac{d}{dt} i_a + k_c L_s \frac{d}{dt} i_0 \quad (6)$$

결합 인덕터의 결합계수 k_c 가 커지면 순환전류에 대한 인덕턴스가 커지고, 상전류에 대한 인덕턴스가 작아진다는 것을 (6)식을 통해 알 수 있다.

3. 병렬 Interleaved 컨버터 모델링

그림 3은 식 (6)과 [1]에서 제안되어진 평균화 모델을 이용해서 새로운 평균화 모델을 제안하였다. 이 모델은 고주파수를 갖는 순환전류와 저주파수를 갖는 순환전류를 동시에 저감시킬 수 있는 있는 모델이다.

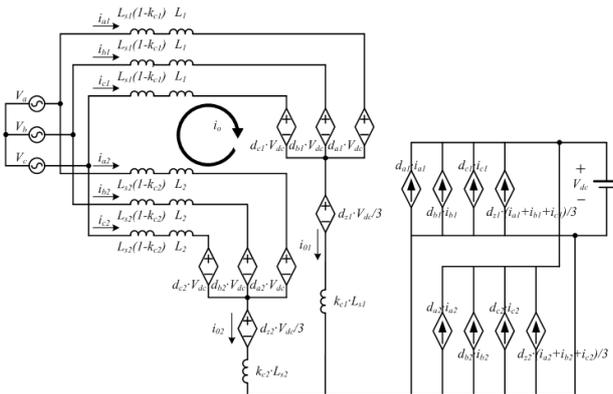


그림 3 영상성분과 결합 인덕터를 포함한 병렬 Interleaved 컨버터 평균화 모델

Fig. 3 Averaged model including coupled inductor with zero sequence components proposed in this paper

4. 시뮬레이션

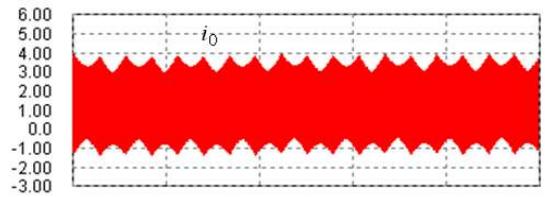
시뮬레이션 분석에 사용된 설계 사양은 표 1과 같다. 고주파수 순환전류와 저주파수 순환전류를 동시에 발생시키기 위해서 Interleaved PWM과 AC단의 line 인

덕터 파라미터를 불일치시킨다. 그 결과 그림 4(a)의 순환전류가 발생하였다. 그림 4(b)는 순환전류 제어기^[1]와 결합 인덕터를 사용하여 저감된 순환전류를 보여준다.

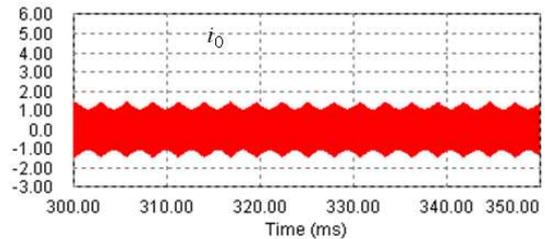
표 1 설계 사양

Table 1 Design Specifications

입력 전압	208 Vrms
출력 전압	400 V
결합 인덕터 (Self, Mutual)	1mH, 0.7mH
line 인덕터	2.9mH (converter1) 3.0mH (converter2)
샘플링 주파수	20 kHz
스위칭 주파수	10 kHz



(a)



(b)

그림 4 병렬 Interleaved 컨버터의 순환전류 파형 (a)저감되지 않은 순환 전류 (b)저감된 순환전류

Fig. 4 Circulating current waveform in Parallel Interleaved converters (a)waveform without mitigating circulating current (b)waveform with mitigating circulating current

5. 결론

병렬 Interleaved 컨버터 시스템에서 순환전류와 상전류에 대한 결합 인덕터의 인덕턴스가 결합 인덕터의 결합계수에 의존한다는 것을 결합 인덕터의 해석적인 접근을 통해 확인하였다. 이러한 접근을 토대로 고주파수와 저주파수 순환전류를 동시에 저감시킬 수 있는 새로운 평균화 모델을 제안하였고, 시뮬레이션 결과를 통해 이를 증명하였다.

본 연구는 전력IT사업단을 통해 지식경제부의 전력산업기술개발사업으로부터 지원받아 수행되었습니다.

참고 문헌

[1] Z. Ye, D. Boroyevich, J.Y.Choi and F. C. Lee "Control of circulating current in two parallel three-phase boost rectifiers," IEEE Trans.Ind. Electron., vol. 17, pp. 609, Sep. 2002.
[2] L. Asiminoaei, E. Aeloiza, P. N. Enjeti, and F. Blaabjerg, "Shunt active-power-filter topology based on parallel interleaved inverters," IEEE Trans.Ind. Electron., vol. 55, no. 3, pp. 1175-1189, Mar. 2008.