

고전력 연료전지 시스템을 위한 커플링 인덕터를 사용한 DC/DC 부스트 컨버터

김운호, 김지민, 문현욱, 정은진, 원충연*
 중앙대학교, 성균관대학교*

DC/DC Boost Converter using Coupling Inductor For High Power Fuel Cell Systems

Y. H. Kim, J. M. Kim, H. W. Moon, E. J. Jung, C. Y. Won*
 ChungAng Univ., Sungkyunkwan Univ.*

ABSTRACT

연료전지는 차세대 대체 에너지원으로 부각되고 있다. 그러나 연료전지시스템 특성상 전류의 정격이 크므로 전류의 리플성분을 감소시킬 필요가 있다. 본 논문에서는 부스트 컨버터 회로에서 인덕터에 흐르는 전류의 리플성분을 줄이기 위한 방법으로 3-channel 감·가극성 커플링 인덕터를 사용한 부스트 컨버터를 제안하였고 이를 일반적인 인덕터, 2-channel 감·가극성 커플링 인덕터를 사용한 컨버터 시스템과 비교 분석하고 시뮬레이션을 통해 시스템의 적합성을 검증하였다. 커플링 인덕터를 사용함으로써 전류 리플 성분이 감소될 뿐 아니라 시스템 효율, 무게, 가격 면에서의 효과도 기대된다.

1. 서 론

오늘날 화석연료의 고갈과 대기오염의 문제성을 극복하기 위한 여러 방법이 대두되고 있으며 다양한 에너지원이 연구개발이 이루어지고 있다. 연료전지는 현재의 화석 연료를 대체할 에너지원으로서의 가능성이 크다. 연료전지는 기존의 DC 전원과 달리 부하에 따라 전압이 크게 변동하는 비선형성과 느린 동특성을 가지고 있다.^[1]

본 논문에서는 연료 전지를 입력 전압원으로 사용하는 부스트 컨버터 회로방식에 관하여 고찰하였다. 인덕터에 흐르는 전류의 리플성분을 줄이기 위한 방법으로 3-channel 감·가극성 커플링 인덕터를 사용한 부스트 컨버터를 제안하였고 이를 일반적인 인덕터, 2-channel 감·가극성 커플링 인덕터와 비교 분석하고 시뮬레이션을 통해 시스템의 적합성을 검증하였다. 커플링 인덕터를 사용함으로써 전류 리플 성분이 감소될 뿐 아니라 시스템 효율, 무게, 가격 면에서의 효과도 기대된다.

2. 2-Channel 감·가극성 커플링 인덕터를 이용한 컨버터 시스템

2.1 감극성 커플링 인덕터를 사용한 부스트컨버터

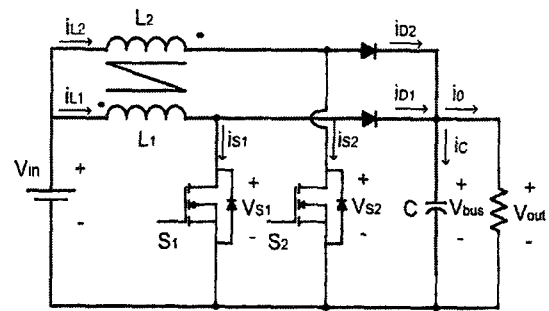


그림 1. 감극성 커플링 인덕터를 사용한 부스트 컨버터의 전력회로

Fig. 1. Power circuit of the boost converter using inverse coupling inductor

그림 1은 감극성 커플링 인덕터를 사용한 부스트 컨버터의 전력회로를 나타낸다. S1과 S2의 스위치가 180° 위상 전위하며 스위칭이 된다. 인덕터 두 개를 사용함으로써 흐르는 전류를 절반씩 부담함으로써 인덕터 설계시 크기를 줄일 수 있다는 장점을 가져오고 스위칭 기법에 의해 합성 전류의 피크 투 피크를 줄일 수 있다는 장점을 가져온다.^{[2][3]}

그림 1에서 S1, S2 스위칭 패턴에 의해 모드별로 인덕턴스를 구하면 다음과 같다. L1과 L2가 같은 값을 갖는다고 한다면 L_{eq} 가 L보다 큰 모드에서는 인덕턴스의 크기가 증가한 것이므로 이 구간에서는 전류의 기울기가 완만해져서 전류의 변화율이 작게 된다. 반면 L_{eq} 가 L보다 작은 모드에서는 커플링 인덕터의 특성 때문에 인덕턴스의 크기가 감소한 것이므로 이 구간에서는 전류의 기울기가 커져 전류의 변화율이 커지게 된다.

$$\begin{aligned}
 \text{M1: } & \begin{cases} V_1 = V_{bs} - V_{in} \\ V_2 = V_{bs} - V_{in} \end{cases} \rightarrow V_1 = (L-M) \frac{d_1}{dt} \quad L_{eq1} = L-M < L \\
 \text{M2: } & \begin{cases} V_1 = V_{in} \\ V_2 = V_{bs} - V_{in} \end{cases} \rightarrow V_1 = \frac{L^2 - M^2}{L + \frac{D_1}{D_2} M} \frac{d_1}{dt} \quad L_{eq2} = \frac{L^2 - M^2}{L + \frac{D_1}{D_2} M} > L \\
 \text{M3: } & \begin{cases} V_1 = V_{bs} - V_{in} \\ V_2 = V_{bs} - V_{in} \end{cases} \rightarrow V_1 = (L-M) \frac{d_1}{dt} \quad L_{eq3} = L-M < L \\
 \text{M4: } & \begin{cases} V_1 = V_{bs} - V_{in} \\ V_2 = V_{in} \end{cases} \rightarrow V_1 = \frac{L^2 - M^2}{L + \frac{D_2}{D_1} M} \frac{d_1}{dt} \quad L_{eq4} = \frac{L^2 - M^2}{L + \frac{D_2}{D_1} M} > L
 \end{aligned}
 \tag{1}$$

감극성 커플링 인덕터의 경우 한 주기 동안 L_{eq} 가 L 보다 큰 모드 구간이 크므로 전류 리플이 줄게 되는 장점을 갖는다. 반면 가극성 커플링 인덕터의 경우 L_{eq} 가 L 보다 큰 모드 구간이 적어서 전류의 리플이 증가하게 되는 단점을 갖는다. 식 (1)을 기초로 모드에 따른 각각의 인덕터에 흐르는 전류의 모양을 살펴보면 그림 2와 같다.

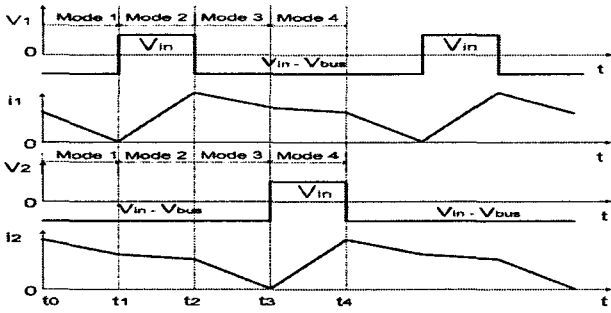


그림 2. 감극성 커플링 인덕터를 사용한 부스트 컨버터의 인덕터 전압, 전류 파형

Fig. 2. The current and voltage waveforms of each inductor at boost converter using inverse coupling inductor

2.2 가극성 커플링 인덕터를 사용한 부스트 컨버터

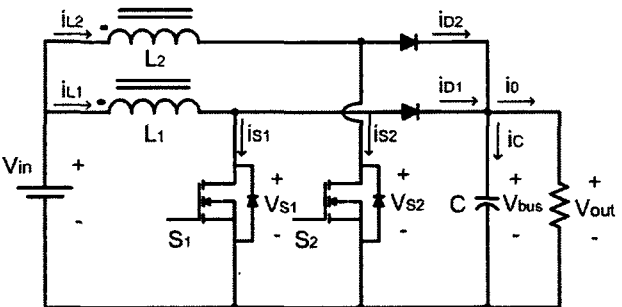


그림 3. 가극성 커플링 인덕터를 사용한 Boost converter의 전력회로

Fig. 3. Power circuit of the boost converter using direct coupling inductor

그림 3은 가극성 커플링 인덕터를 사용한 부스트 컨버터의 전력회로를 나타낸다. 감극성 커플링 인

덕터를 사용한 부스트 컨버터와 그 특성이 비슷하다. 그림 3은 가극성 커플링 인덕터를 사용한 부스트 컨버터의 전력회로를 나타낸다. 감극성 커플링 인덕터를 사용한 부스트 컨버터와 그 특성이 비슷하다. 단 차이점은 커플링 인덕터의 타입이 감극성이어서 가극성 커플링 인덕터일 때의 모드에 따른 등가 인덕턴스의 값이 가극성일 때와는 다른 수식 관계를 갖는 것이다. 가극성 커플링 인덕터의 모드에 따른 등가 인덕턴스는 식 (2)와 같다.

$$\begin{aligned}
 \text{M1: } & \begin{cases} V_1 = V_{bs} - V_{in} \\ V_2 = V_{bs} - V_{in} \end{cases} \rightarrow V_1 = (L+M) \frac{d_1}{dt} \quad L_{eq1} = L+M > L \\
 \text{M2: } & \begin{cases} V_1 = V_{in} \\ V_2 = V_{bs} - V_{in} \end{cases} \rightarrow V_1 = \frac{L^2 - M^2}{L - \frac{D_1}{D_2} M} \frac{d_1}{dt} \quad L_{eq2} = \frac{L^2 - M^2}{L - \frac{D_1}{D_2} M} < L \\
 \text{M3: } & \begin{cases} V_1 = V_{bs} - V_{in} \\ V_2 = V_{bs} - V_{in} \end{cases} \rightarrow V_1 = (L+M) \frac{d_1}{dt} \quad L_{eq3} = L+M > L \\
 \text{M4: } & \begin{cases} V_1 = V_{bs} - V_{in} \\ V_2 = V_{in} \end{cases} \rightarrow V_1 = \frac{L^2 - M^2}{L - \frac{D_2}{D_1} M} \frac{d_1}{dt} \quad L_{eq4} = \frac{L^2 - M^2}{L - \frac{D_2}{D_1} M} < L
 \end{aligned}
 \tag{2}$$

식 (1)과 (2)에서 알 수 있듯이 커플링 인덕터는 상호 인덕턴스에 의해 모드에 따라 L_{eq} 이 L 보다 크거나 작아진다. 모드에 따른 변화는 감극성과 가극성일 때가 서로 반대가 되는 것을 알 수 있다. 식 (2)를 기초로 모드에 따른 각각의 인덕터에 흐르는 전류의 모양을 살펴보면 그림 4와 같다.

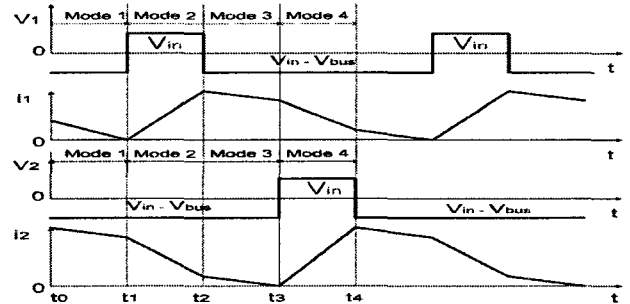


그림 4. 가극성 커플링 인덕터를 사용한 Boost Converter의 인덕터 전압, 전류 파형

Fig. 4. The current and voltage waveforms of each inductor at boost converter using direct coupling inductor

2.3 2-Channel 감·가극성 커플링 인덕터의 비교

식 (1)과 (2)에서 알 수 있듯이 커플링 인덕터는 상호 인덕턴스에 의해 모드에 따라 L_{eq} 이 L 보다 크거나 작아진다. 모드에 따른 변화는 감극성과 가극성일 때가 서로 반대가 되는 것을 알 수 있다.

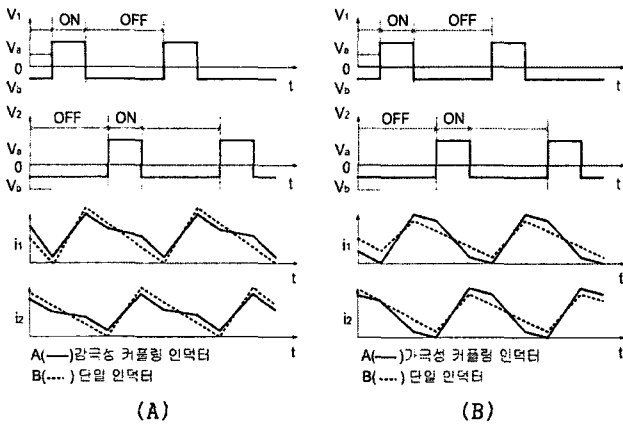


그림 5. 커플링 인덕터의 모드별 전압 전류 파형
 (A) 감극성 커플링 인덕터에 대한 전류 파형
 (B) 가극성 커플링 인덕터에 대한 전류 파형
 Fig. 5 The current waveforms for coupling inductors
 (A) Inductor current for direct coupling inductors
 (B) Inductor current for inverse coupling inductors

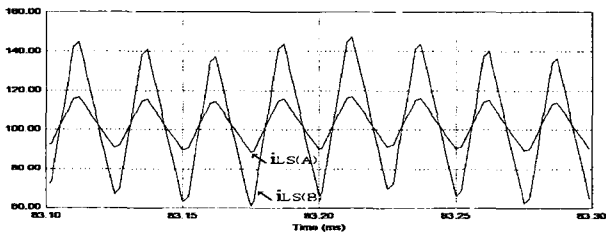


그림 6. 감·가극성 커플링 인덕터의 합성 전류
 Fig. 6. The sum current of inverse and direct coupling inductor

그림 5에서 알 수 있듯이 그림 5(A)와 (B)의 실선(커플링 인덕터에 흐르는 전류)을 비교해보면 각각 인덕터에 흐르는 전류의 피크 두 피크는 감극성 커플링 인덕터의 경우가 가극성 커플링 인덕터의 경우보다 그 크기가 줄어든 것을 알 수 있다. 인덕터에 흐르는 전류의 피크 두 피크 성분이 줄어든다면 감극성 커플링 인덕터 설계시 권선의 굵기를 단일 인덕터를 사용했을 때의 경우보다 얇은 권선의 굵기로 같은 인덕턴스의 값을 감아도 무방하다는 것을 의미한다. 이는 인덕터의 크기와 부피를 줄이게 됨으로 시스템의 소형화와 경량화를 동시에 얻을 수 있다는 장점을 갖는다. 그러나 그림 6에서처럼 감·가극성 커플링 인덕터의 흐르는 전류의 합성 전류 측면에서 살펴보면 가극성 커플링 인덕터의 합성 전류($iLs(A)$)가 감극성 커플링 인덕터의 합성 전류($iLs(B)$)에 비해 피크 두 피크가 작음을 알 수 있다. 이는 입력원에 흐르는 전류가 가극성 커플링의 경우는 피크 두 피크가 작음으로 전압원에 미치는 영향이 감극성에 비해 적다는 장점을 갖는다.

3. 3-Channel 감·가극성 커플링 인덕터 컨버터

3-channel 커플링 인덕터 부스트 컨버터는 2-channel 커플링 인덕터를 사용하는 부스트 컨버터에 비해 인덕터에 흐르는 전류의 리플 성분과 피크 투 피크를 감소시켜 인덕터의 크기와 부피를 더 줄일 수 있는 장점을 가져온다.

3.1 감극성 커플링 인덕터를 사용한 부스트컨버터

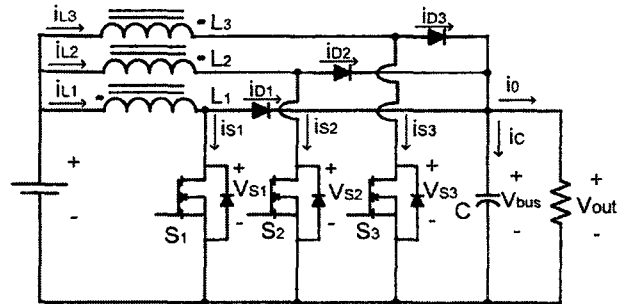


그림 7. 3-channel 감극성 커플링 인덕터를 사용한 회로
 Fig. 7. Power circuit of the boost converter using three-channel direct coupling inductor

그림 7은 3-channel 감극성 커플링 인덕터를 사용한 부스트 컨버터 회로이다. 회로의 특성은 2-channel 감극성 커플링 인덕터를 사용한 부스트 컨버터와 동일하다.

3.2 가극성 커플링 인덕터를 사용한 부스트컨버터

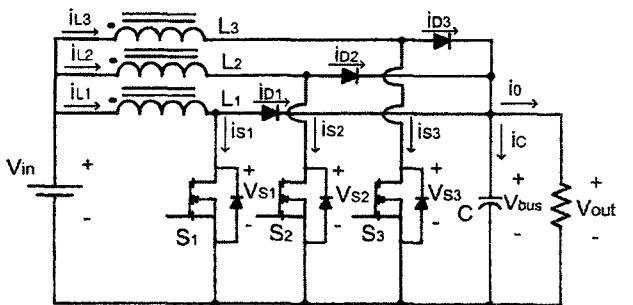


그림 8. 3-channel 가극성 커플링 인덕터를 사용한 회로
 Fig. 8. Power circuit of the boost converter using three-channel inverse coupling inductor

그림 8은 L_1, L_2, L_3 이 모두 같은 방향으로 권선을 감은 3-channel 가극성 커플링 인덕터를 사용한 부스트 컨버터 회로이다. 이 토폴로지는 감극성 커플링 인덕터를 사용하는 부스트 컨버터에 비해 인덕터의 합성 전류의 리플 성분이 줄어든다는 단점을 가지고 있지만 각각의 인덕터에 흐르는 전류의 피크 투 피크는 증가한다는 단점을 가지고 있다.

4. 시뮬레이션 결과

4.1 시뮬레이션 조건

입력원으로는 PEMFC(Proton Exchange Membrane fuel Cell) 타입의 185Vdc, 108.1A, 20kW급 연료 전지를 고려하였다. 출력 전압은 231.25Vdc로 설정하여, 듀티 사이클은 voltage-second 평형 조건식 식에 따라 0.2가 된다. 인덕터의 크기를 줄이기 위해 스위칭 주파수를 20kHz로 설정하였다. 커플링 인덕터의 인덕턴스 L_1, L_2, L_3 은 모두 같은 값을 갖고, 상호 인덕턴스(M)도 모두 같은 값을 갖는다고 가정한다. $M/L=0.5$ 이다. 이와 같은 조건에서 2·3-channel 일반적인 인덕터, 2-channel 커플링 인덕터(감·가극성), 3-channel 커플링 인덕터(감·가극성)에 대해 각각의 인덕터에 흐르는 전류, 그리고 인덕터 합성 전류에 대해서 전류의 파형을 케이스 별로 비교 분석 하였다.

4.2 2-channel 일반 인덕터와 3-channel 일반 인덕터의 비교

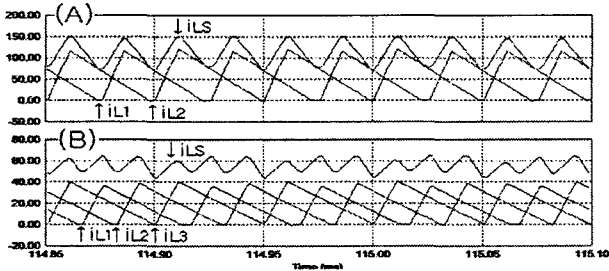


그림 9. 일반 인덕터를 병렬로 연결한 부스트 컨버터에서 인덕터 각각에 흐르는 전류와 합성 전류 파형

(A) 2-Channel 일반 인덕터 (B) 3-Channel 일반 인덕터

Fig. 9. Currents and the compound currents waveforms in boost converter parallel connected with conventional inductors

(A) 2-Channel conventional inductor

(B) 3-Channel conventional inductor

그림 9(A)와 (B) 그림 9는 일반 인덕터를 2-channel과 3-channel로 연결한 부스트 컨버터에서 인덕터 각각에 흐르는 전류와 합성 파형을 보여준다. 그림 9(A)와 (B)에서 알 수 있듯이 2-channel 인덕터와 3-channel 인덕터 각각에 흐르는 전류의 정격이 줄어들 수 있고 합성 전류의 피크 투 피크가 3-channel이 보다 작음을 알 수 있다. 그러나 3-channel 인덕터의 합성 전류에 고주파수 전류 성분이 나타나는 단점을 가진다.

4.3 2-channel 가극성 커플링 인덕터와 3-channel 가극성 커플링 인덕터의 비교

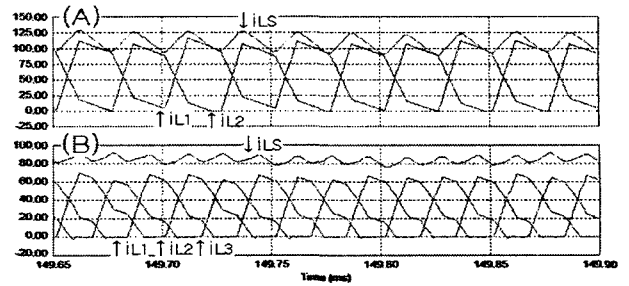


그림 10. 가극성 커플링 인덕터를 사용한 부스트 컨버터에서 인덕터 각각에 흐르는 전류와 합성 전류 파형

(A) 2-channel 가극성 커플링 인덕터

(B) 3-channel 가극성 커플링 인덕터

Fig. 10. Currents and the compound currents waveforms in boost converter using direct coupling inductors

(A) 2-Channel direct coupling inductors

(B) 3-Channel direct coupling inductors

그림 10은 가극성 커플링 인덕터를 사용한 2-channel과 3-channel 부스트 컨버터에서 각각의 인덕터 흐르는 전류(i_{L1}, i_{L2}, i_{L3})와 합성 전류(i_{LS}) 파형을 보여준다. 그림 10(A)와 (B)에서 알 수 있듯이 2-channel 커플링 인덕터와 3-channel 커플링 인덕터 각각에 흐르는 전류의 정격이 줄어들 수 있고, 합성 전류의 피크 투 피크가 3-channel이 보다 작음을 알 수 있다. 또한 그림 9와 비교했을 때 합성 전류의 피크 투 피크는 가극성 커플링 인덕터를 사용했을 경우가 일반적인 인덕터를 사용했을 때 보다 더 작다는 장점을 갖는다. 그러나 3-channel 인덕터의 합성 전류에 고주파수 전류 성분이 나타나는 것과 그림 9와 비교했을 때 각각의 인덕터에 흐르는 전류의 피크 투 피크가 늘어나는 단점들을 가진다.

4.4 2-channel 감극성 커플링 인덕터와 3-channel 감극성 커플링 인덕터의 비교

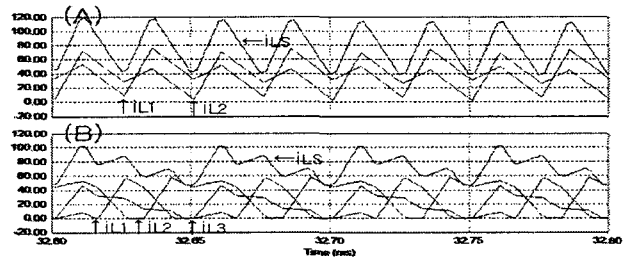


그림 11. 감극성 커플링 인덕터를 사용한 부스트 컨버터에서 인덕터 각각에 흐르는 전류와 합성 전류 파형

(A) 2-channel 감극성 커플링 인덕터

(B) 3-channel 감극성 커플링 인덕터

Fig. 11. Currents and the compound currents waveforms in boost converter using inverse coupling inductors

(A) 2-Channel inverse coupling inductors

(B) 3-Channel inverse coupling inductors

5. 결 론

그림 11(A)와 (B)를 비교하면 인덕터의 합성 전류의 피크 투 피크는 감소하고, 각각의 인덕터에 흐르는 전류 i_{L1} 을 제외한 i_{L2} , i_{L3} 는 그림 11(A)의 i_{L1} , i_{L2} 에 비해 피크 투 피크가 감소하였음을 알 수 있다. 그러나 그림 11(B)를 보면 각각의 인덕터에 흐르는 전류가 비대칭적으로 보인다. 3-channel 감극성 커플링 인덕터의 구조상 하나의 인덕터가 다른 두 개와는 다른 방향으로 권선이 감기게 되기 때문이고 시뮬레이션 조건에서 세 개의 인덕터의 인덕턴스 및 상호 인덕턴스의 값이 동일하다고 가정하기 때문에 전류의 파형이 비대칭적 구조로 나타나게 된다. 인덕턴스의 값과 상호 인덕턴스의 값이 특정 조건의 값을 만족하게 된다면 3-channel 감극성 커플링 인덕터를 사용한 부스트 컨버터의 전류 파형은 대칭적으로 될 수 있을 것이고, 이는 2-channel 감극성 커플링 인덕터에서 얻을 수 있는 전류의 피크 투 피크 성분의 감소 효과를 얻을 수 있을 것이다.

4.5 2-channel, 3-channel 일반 인덕터·감/가극성 커플링 인덕터 합성전류의 비교

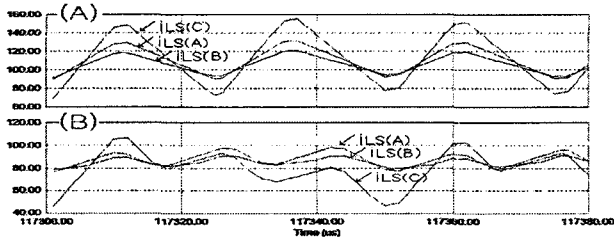


그림 12. 2-channel, 3-channel 일반 인덕터($i_{LS(A)}$ · $i_{LS(B)}$)/감극성($i_{LS(C)}$) 커플링 인덕터 합성전류 파형
(A) 2-channel 일반 인덕터·가/감극성 커플링 인덕터 합성 전류
(B) 3-channel 일반 인덕터·가/감극성 커플링 인덕터 합성 전류

Fig. 12. Waveforms of the compound currents in case of 2-channel, 3-channel conventional inductor direct/inverse coupling inductor
(A) The compound currents of 2-channel conventional inductor direct/inverse coupling inductor
(B) The compound currents of 3-channel conventional inductor direct/inverse coupling inductor

그림 12는 2-channel, 3-channel 일반 인덕터·가/감극성 커플링 인덕터 합성전류 파형을 비교한 것이다. 2-channel, 3-channel의 경우 모두 합성 전류의 피크 투 피크치가 가극성, 일반 인덕터, 감극성 커플링 인덕터 순으로 커지는 것을 볼 수 있다.

본 논문에서는 입력 전원으로 연료전지를 사용하여 보다 안전성이 높은 시스템을 구현하기 위해 2-channel 커플링 인덕터를 이용한 부스트 컨버터와 3-channel 커플링 인덕터를 사용한 부스트 컨버터를 비교 분석하였다. 전압을 승압 과정에서 인덕터에 흐르는 전류에 리플성분은 커지게 된다. 이를 감소시키면서 고 전력에 적합한 커플링 인덕터를 사용한 부스트 컨버터 방식을 제시하였다. 본 논문에서는 시뮬레이션을 통해 이론적 타당성을 검증하였으며, 그 결과 2-channel 커플링 인덕터보다 3-channel 커플링 인덕터를 병렬 연결한 부스트 컨버터를 사용했을 경우 전류 정격 용량을 분산시킬 수 있었으며 입력전류의 스위칭 리플과 피크 투 피크를 감소시킬 수 있었다. 커플링 인덕터 타입을 선택할 때 합성전류 리플성분을 고려한다면 가극성 커플링 인덕터를 사용하는 것이 좋고, 인덕터 각각에 흐르는 전류 리플성분을 고려한다면 감극성 인덕터를 사용하는 것이 유리하다. 위와 같이 감극성 커플링 인덕터와 가극성 커플링 인덕터를 시스템의 목적에 따라 적절히 선택함으로써 전류리플성분을 줄일 수 있어 시스템의 안정성, 인덕터 경량화를 가져올 수 있을 것으로 기대 된다.

이 논문은 산업자원부에서 시행한 전력산업 인프라 구축지원사업으로 수행된 논문입니다

참 고 문 헌

- [1] 김재언 “분산전원 연계배전계통 보호방식상의 문제점에 대한 대책” 전력전자 학회지 2000년 12월호
- [2] X Huang, X Wang, "Parasitic Ringing and Design Issues of High power interleaved boost converters", Power Electronics Specialists Conference, 2002. pesc 02. 2002 IEEE 33rd Annual, Volume: 1, 23-27 June 2002 Pages:30 - 35 vol.1
- [3] P.L Wong; P. Xu, P. Yang, F.C Lee, "Performance improvements of interleaving VRMs with coupling inductors", Power Electronics, IEEE Transactions on, Volume: 16, Issue: 4, July 2001 Pages:499 - 507
- [4] P.-L.Wong, F.C.Lee, "A novel modeling concept for multi-coupling core structures", Applied Power Electronics Conference and Exposition, 2001. APEC 2001. Sixteenth Annual IEEE, Volume: 1, 4-8 March 2001, Pages:102 - 108 vol.1