

연료전지용 다상 부스트 컨버터 불연속 모드 특성 해석

김동희, 최규영, 이병국  
성균관대학교

Analysis of Interleaved Boost Converter at DCM for Fuel Cell Applications

Dong-Hee Kim, Gyu-Yeong Choe, Byoung-Kuk Lee  
Sungkyunkwan University

**Abstract** - 본 논문에서는 연료전지에 적용될 수 있는 다상부스트의 동작과 전류 불연속 모드에서 입력전류의 발생 추이를 수식적으로 제시하였다. 제시한 방법은 입력전류의 구간을 나누어 구간마다 입력 전류의 상태 방정식을 각각 유도 하였으며 이를 바탕으로 리플크기를 나타내었다.

1. 서 론

미래의 대체 에너지로 주목 받는 연료전지, 태양광 발전, 풍력 발전 등과 같은 분산 전원들은 발전 방식에 따라 전력변환기가 필수적으로 요구 되고, 특성에 따라 적용되는 전력변환기가 달라진다. 특히 연료전지의 경우는 셀 특성상 낮은 전압으로 인하여, 저전압 대전류의 특성 때문에 승압용 전력 변환기가 필수적으로 사용 된다. 이 때문에 저전압 출력을 상승시키고, 대전류를 분담하는 방식인 다상 부스트 컨버터(IBC:Interleaved Boost Converter)방식의 병렬형 컨버터가 적합한 모형이라 할 수 있다[1]. N개의 상으로 구성된 IBC는 각상마다  $\tau(=T_s/N)$  만큼 위상차를 가지기 때문에 적은 리플을 가지고, 상전류의 크기도 1/N배 만큼 줄어, 전력변환 소자의 전류 스트레스를 줄여 비용을 절감할 수 있다. 입력 전류의 주파수는 각각의 스위칭 주파수보다 큰 주파수를 갖게 되어 연료전지에 미치는 영향이 줄어들게 된다. 부스트 컨버터의 동작모드는 크게 CCM(Continuous Conduction Mode)와 DCM(Discontinuous Conduction Mode)로 나뉜다. 일반적인 부스트 컨버터의 경우 DCM으로 동작을 하게 되면 불연속적인 전류로 인해 연료전지에 악영향을 끼치기 때문에 CCM으로 동작해야 한다. 하지만 IBC의 경우 각각의 상전류는 불연속일지라도 입력 전류는 연속 전류가 되므로 연료전지에 악영향을 줄일 수 있다.

위에서 언급한 고효율, 전류분배, 적은 입력 전류 리플과 전류 스트레스를 줄일 수 있는 이점이 있기 때문에 IBC에 관한 많은 연구가 진행되었다. 종래의 IBC기술은 입력전류의 리플을 줄이기 위해 커플링 인덕터를 사용하거나[2], 역률 보상회로용 IBC[3], 소신호 모델링을 통한 제어 성능 향상에 관한 연구가 수행 되었다[4]. 또한 커플링 인덕터에 따라 입력, 출력 전류의 리플분석이 이루어졌다. 하지만 기존의 논문은 CCM으로 동작하는 다상부스트 특성을 해석과 효율 및 전류, 전압의 정상 상태 해석이 대부분 이었다.

그러므로 본 논문은 여러 가지 이점을 가진 DCM으로 동작하는 다상 부스트의 동작 모드와 스위칭 패턴, 통류율, 구간에 따른 입력전류 해석을 수행 하였다. 또한 DCM에서 듀티에 따른 입력전류리플크기 관한 수식을 유도하였다.

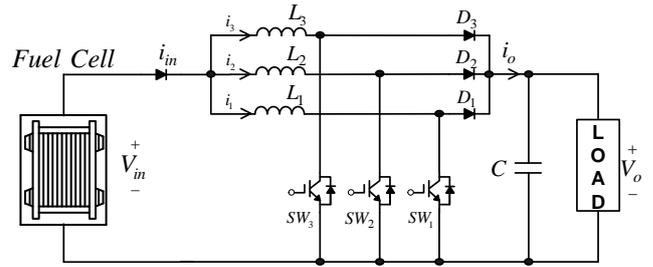
2. 본 론

2.1 다상 부스트 컨버터의 구성

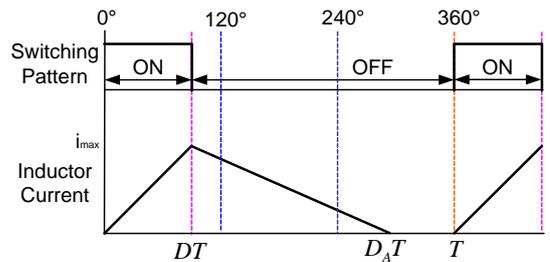
그림 1은 3상 IBC 부스트의 구성을 나타낸다. 인덕터, 스위치와 다이오드가 병렬로 연결되어 있고, 각각이 하나의 출력 커패시터에 연결되어 있다. 각상의 스위칭 주파수는 동일하고  $120^\circ (=360/N)$ 씩 위상차이가 난다. 그러므로 각상에 흐르는 상전류는 위상차이만 있고 각각의 합은 입력전류  $i_{in}$ 이 되므로 각상의 입력 전류 리플, 출력 전압 전압 리플, 전류 스트레스와 인덕터의 사이즈가 크게 줄어든다.

2.2 다상 부스트 컨버터 동작 원리

그림 2는 다상 부스트 컨버터의 한상의 스위칭 동작을 나타낸다. 스위치가 온 되는 DT구간 동안 인덕터에 전류가 저장되고 오프 되는  $(1-D)T$  동안 저장된 전류가 하강된다. 구간 중  $D_A T$  시간 때 인덕터 전류가 0이 되면 전류 불연속 모드로 동작한다. 이때 입력 전압과 출력 전압의 전압 전달비와 인덕터 전류의 상승, 하강 기울기는 각각 식 (1), (2), (3)과 같다.



<그림 1> 3-phase interleaved 부스트 컨버터



<그림 2> 한상의 스위칭 패턴에 따른 인덕터 전류

$$\frac{V_o}{V_{in}} = \frac{D_A}{(D_A - D)} \tag{1}$$

$$\frac{di_{Lj}}{dt} = \frac{V_{in}}{L_j} \tag{2}$$

$$\frac{di_{Lj}}{dt} = \frac{V_{in} - V_o}{L_j} = \frac{-DV_{in}}{L(D_A - D)} \tag{3}$$

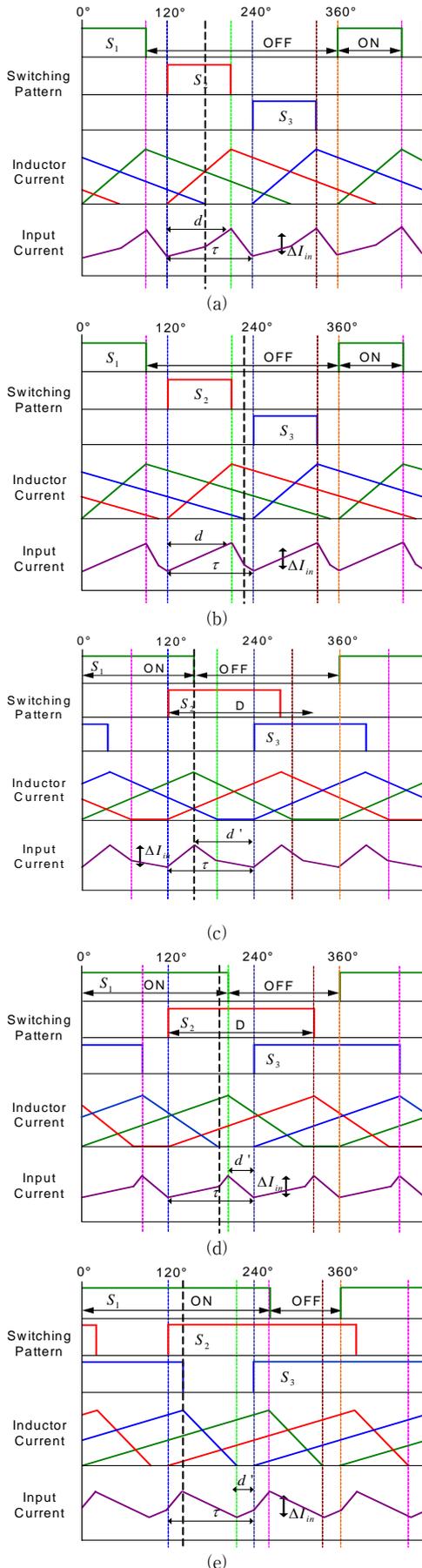
이때  $D_A$ 는 부스트 컨버터의 각상의 스위칭 주파수  $f_s(=1/T)$ , 인덕터의 인덕턴스  $L_j$ , 통류율  $D$ , 부하전류  $i_o$ 에 따라 변한다.  $D_A$ 는 식 (4)와 같다[5].

$$D_A = D + \frac{2L_j i_o}{TDV_{in}} \tag{4}$$

$D_A$ 는 여러 가지 요소에 변하기 때문에 그림 3과 같이 상전류의 합인 입력 전류  $i_{in}$ 는 단상 부스트와 다르게 연속 모드로 동작하고 각 상의 스위칭 주파수보다 N배 큰 주파수를 가진다. 이때  $\tau$ 는 상전류의 합인 입력 전류의 주기를 나타낸다. 또한 각상의 인덕터 전류는 상승 기울기와 하강 기울기가 한 가지 경우만 있으나, 입력전류는 상승 구간에서 2가지 기울기 값을 가지게 된다. 입력 전류는 각 상전류의 합이기 때문에 한주기 내의 3가지 구간에서 각 상별로 불연속 구간, 증가 구간, 감소구간이 다르게 존재하기 때문에 DCM 경우 해석의 어려움이 따른다.

2.3 입력 전류 분석

$D_A$ 에 따라서 상승구간 또는 하강구간에서 2가지 기울기 크기를 가진다. 이를 나누는 기준은 2가지로 나뉜다.



〈그림 3〉 듀티에 따른 입력전류 변화

(a), (b)  $0 \leq D \leq 0.33$ , (c), (d)  $0.33 \leq D \leq 0.66$ , (e)  $0.66 \leq D \leq 1$

1) 통류율  $D$ 의 범위

: a)  $0 \leq D \leq 0.33$  b)  $0.33 \leq D \leq 0.66$  c)  $0.66 \leq D \leq 1$

2)  $D_A$ 의 범위

통류율이 a)의 범위에 있을 경우 한상과  $240^\circ$  차이 나는 상에 대해서 감소 구간의 최솟값(=0)이 On 시점보다 왼쪽에 있으면 상승하는 구간의 기울기가 2가지가 되고, On 시점보다 오른쪽에 있으면 하강하는 구간의 기울기가 2가지 크기의 값을 가진다. 통류율이 b)의 경우에는 한상과  $120^\circ$  차이 나는 상에 대해서 동일한 결과를 가진다. 통류율이 c)인 경우는 각상의 스위칭 패턴이 서로 겹쳐져 있기 때문에 한상의 최솟값이 되는 지점은 항상 나머지 두상의 On 시점의 왼쪽에 존재하게 되어 상승 때 기울기가 2가지 크기를 가진다. 또는 CCM으로 동작하게 된다.

그림 3의 (a)의 입력 전류의 상태 방정식을 구하면 다음과 같다. 해석의 편의를 위해 각 과형의 시작은 0부터 시작한다고 가정한다. 그리고 각상의 전류의 기울기는 같고 단순히 위상만 틀리다고 가정한다. 각상의 상승, 하강 시 상전류는 식 (5), (6)과 같다

$$\frac{V_{in}}{L}(t + \frac{k}{3}D) \quad (k=0,1,2) \quad (5)$$

$$\frac{V_{in}DT}{L}DT - \frac{D_A V_{in}}{L(D_A - D)}(t + \frac{k}{3}D) \quad (k=0,1,2) \quad (6)$$

입력전류는 3구간으로 나뉜다. 각 구간의 입력전류의 상태 방정식은 다음과 같다. 그리고 앞서 언급했듯이 그림 3-(a)는 상승 기울기가 2가지 크기를 가지므로  $D_A < 2/3$ 를 만족해야 하고 그림 3-(b)는 하강 기울기가 2가지인 경우이므로,  $D_A > 2/3$ 를 만족한다. 또한 입력전류의 리플 크기는 기울기 크기가 하나인 구간에서 시간을 곱하면 구할 수 있다.

$$\frac{V_{in}}{L}(t + 2 - \frac{D_A}{D_A - D}(2t + T)) \quad (0 \leq t \leq (D + D_A - 1)T) \quad (7)$$

$$\frac{V_{in}}{L}(t + 1 - \frac{D_A}{D_A - D}(t + \frac{T}{3})) \quad ((D + D_A - 1)T \leq t \leq DT) \quad (8)$$

$$\frac{V_{in}}{L}(2 - \frac{D_A}{D_A - D}(2t + \frac{T}{3})) \quad (DT \leq t \leq \frac{1}{3}T) \quad (9)$$

$$\Delta I_{in} = \frac{V_{in}}{L}(2 - \frac{D_A}{D_A - D}(2t + \frac{T}{3})) \cdot (\frac{1}{3} - D)T \quad (10)$$

$$\frac{V_{in}}{L}(t + 2 - \frac{D_A}{D_A - D}(2t + T)) \quad (0 \leq t \leq DT) \quad (11)$$

$$\frac{V_{in}}{L}(3 - \frac{D_A}{D_A - D}(3t + T)) \quad (DT \leq t \leq (D_A - \frac{2}{3})T) \quad (12)$$

$$\frac{V_{in}}{L}(2 - \frac{D_A}{D_A - D}(2t + \frac{T}{3})) \quad ((D_A - \frac{2}{3})T \leq t \leq \frac{1}{3}T) \quad (13)$$

$$\Delta I_{in} = \frac{V_{in}}{L}(t + 2 - \frac{D_A}{D_A - D}(2t + T)) \cdot DT \quad (14)$$

### 3. 결 론

본 논문에서는 연료전지에 적용될 수 있는 불연속 모드 다상 부스트 컨버터의 동작과 전류 불연속 모드에서 입력전류의 발생 추이를 수식적으로 제시 하였다. 불연속 모드로 동작하는 다상 부스트 컨버터의 입력 전류를 수식적으로 계산 가능하여 컨버터 설계 시 유용하게 활용될 것으로 예상된다. 향후 실험을 통해, 본 논문을 바탕으로 하여 각 듀티 범위마다 최소 입력 전류 리플 크기를 분석하고, 입력 전류 수식의 일반화를 위한 연구를 진행할 예정이다.

### [참 고 문 헌]

- [1] 유병훈, 이태원, 장수진, 이병국, 원충연. "다상부스트를 적용한 연료전지 발전시스템," 전력전자학술대회, pp19-21, 2006
- [2] M.Veerachary, T.senju, K.Uezato, "Maximum power point tracking of coupled inductor interleaved boost converter supplied PV system," IEE Proceedings Electr. Power Appl., Vol. 150, Issue 1, pp.71-80, Jan.2003
- [3] L.Balogh, R.Redl, "Power factor correction with interleaved boost converters in continuous inductor current mode," IEEE Pro. APEC'93 pp.168-174, Mar.1993
- [4] H.B Shin, E.S.Jang, J.K.Park, H.W.Lee, T.A.Lipo, "Small-signal analysis of multiphase DC-DC converters," IEEE Power Electr. and Drive Systems.(PEDS), pp.626-631, July, 1999
- [5] 노의철, 정규범, 최남섭 "전력전자공학" 문운당, pp.216-217 2007