

---

# 인터리브드 부스트 컨버터에 대한 일반화된 출력 커패시터 리플전류 수식에 관한 연구

정용채\*

## A Study on Generalized Output Capacitor Ripple Current Equation of Interleaved Boost Converter

Yong-Chae Jung\*

### 요 약

태양광 시스템이나 연료전지 시스템 그리고 전기자동차에 많이 사용되는 DC-DC 컨버터는 부스트 컨버터이다. 이러한 부스트 컨버터를 병렬로 연결하고 위상차를 두고 동작하여 입출력 전류리플을 줄이는 인터리브드 부스트 컨버터가 최근에 많이 사용되고 있다. 이 회로는 입출력 전류 리플이 작기 때문에 입출력 커패시터의 크기를 줄일 수 있다. 따라서 기존의 전해 커패시터를 신뢰성이 우수한 필름 커패시터로 교체할 수 있고 이는 전체 시스템의 수명 및 신뢰성을 향상시킬 수 있다. 본 논문에서는 다단 인터리브드 부스트 컨버터에 사용되는 출력 커패시터의 전류리플 수식을 유도하고 듀티에 따른 특성을 알아본다. 이를 확인하기 위해서 PSIM 툴을 이용하여 계산된 값과 비교를 할 것이다.

### ABSTRACT

DC-DC converter commonly used in photovoltaic systems, fuel cell systems and electric vehicles is a boost converter. The interleaved boost converter, connected in parallel by several boost converters and operated by the phase difference to reduce the input and output current ripple, has been widely used in recent years. Because of small input and output current ripples, the circuit can reduce the size of the input and output capacitors. Thus, instead of conventional electrolytic capacitor, the film capacitor with high reliability can be used and this is the life and reliability of the entire system can be improved. In this paper, the output current ripple formulas of the multi-stage interleaved boost converter are derived, and the characteristics in accordance with duty are found out. In order to verify the abovementioned contents, the derived results will make a comparison with the calculated values by using PSIM tool.

### 키워드

Interleaved boost converter, Output ripple current, Multi-stage, Ripple current formula  
인터리브드 부스트 컨버터, 출력리플전류, 다단, 리플전류식

### 1. 서 론

최근 에너지 위기 때문에 태양광이나 풍력 및 연

료전지 등과 같은 신재생에너지에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. 또한 전기자동차나 하이브리드 자동차에 대한 연구도 활발히 이뤄지고 있고 상품화되

---

\* 남서울대학교 전자공학과 교수(ychjung@nsu.ac.kr)

접수일자 : 2012. 07. 11

심사(수정)일자 : 2012. 11. 23

게재확정일자 : 2012. 12. 10

어 출시되고 있다. 이러한 시스템들에는 안정화된 직류 전원을 얻기 위해서 DC-DC 컨버터를 사용하는데 대부분은 입력전압보다 출력전압이 큰 부스트 컨버터이다. 특히 전기자동차나 하이브리드 자동차에서는 신뢰성이 매우 중요하므로 전류리플을 줄일 수 있는 인터리브드 부스트컨버터를 많이 사용한다[1-5].

참고문헌 [5]에서는 인터리브드 부스트컨버터의 입력전류 리플에 대해서 수식을 일반화 하였다. 하지만 출력 커패시터에 대한 리플전류의 수식화는 아직 안되어 있는 상황이다. 따라서 본 논문에서는 다단 인터리브드 부스트컨버터의 출력 커패시터에 대한 리플전류에 대해서 수식을 제안하고 이를 일반화한다. 이를 위해서 본 논문에서는 2상, 3상 그리고 4상 인터리브드 부스트컨버터에 대한 수식을 유도할 것이다. 이를 통해서 각 전류식을 일반화해서 좀 더 많은 상에 대한 전류식도 추정해 볼 예정이다. 이러한 결과를 확인하기 위해서 PSIM 모의실험 툴을 활용하여 모의실험을 하고 결과를 유도한 수식과 비교를 하고자 한다.

## II. 2상 인터리브드 부스트 컨버터의 출력전류

그림 1은 2상 인터리브드 부스트 컨버터의 회로도이다. 입출력 사이에 부스트 컨버터의 핵심부인 인덕터와 스위치 및 다이오드가 병렬로 구성되어 있다. 이 회로의 두 스위치  $S_1$ 과  $S_2$ 는 180도의 위상차를 가지고 동작시킨다. 이 때 출력단의 전류 관계식을 정리하면 (1)과 같다.

$$i_d = i_c + I_o \quad (1)$$

이 식의 양변의 평균을 취하면 다이오드 전류의 평균값은 커패시터 전류의 평균값과 부하전류를 더하면 된다. 그런데 커패시터 전류의 평균값은 영이므로 다이오드 전류의 평균값과 부하전류는 같다.

또한 식 (1)의 양변에 대해서 rms값을 계산하여 정리하면 식 (2)와 같다.

$$I_{c,rms}^2 = I_{d,rms}^2 - I_o^2 \quad (2)$$

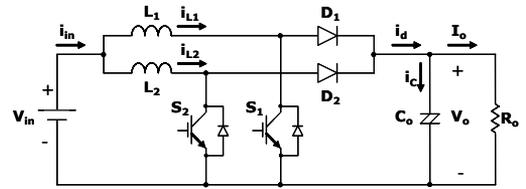


그림 1. 2상 인터리브드 부스트 컨버터 [5]  
Fig. 1 2-stage interleaved boost converter [5]

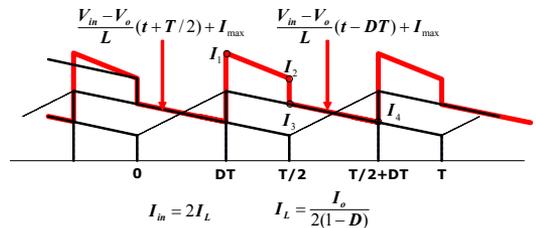


그림 2. 듀티가 0.5보다 작을 때의 다이오드 리플전류  
Fig. 2 Diode ripple current when duty is smaller than 0.5.

따라서 커패시터의 리플전류 값을 계산하려면 다이오드의 리플전류를 이용하여 쉽게 계산할 수 있다.

1)  $0 \leq D \leq 0.5$ 인 경우

그림 2는 듀티가 0.5보다 작을 때 두 인덕터 전류를 이용하여 다이오드의 리플전류를 그린 것이다. 한 주기  $T$  중에서 4점의 전류값을  $I_1$ ,  $I_2$ ,  $I_3$  그리고  $I_4$ 라고 하였다. 이를 식으로 정리하면 다음과 같다.

$$I_1 = I_L \left( 2 + \frac{r}{2} \frac{(1-2D)}{(1-D)} \right) \quad (3)$$

$$I_2 = I_L \left( 2 - \frac{r}{2} \frac{(1-2D)}{(1-D)} \right) \quad (4)$$

$$I_3 = I_L \left( 1 + \frac{r}{2} \frac{D}{(1-D)} \right) \quad (5)$$

$$I_4 = I_L \left( 1 - \frac{r}{2} \frac{D}{(1-D)} \right) \quad (6)$$

$$r \equiv \frac{\Delta I}{I_L} \quad (7)$$

여기서  $r$ 은 current ripple ratio로 식 (7)과 같이

정의되는 값이다.  $I_L$ 은 인덕터 전류의 평균값이고  $D$ 는 듀티이다. 이 식들을 이용하여 커패시터의 리플전류를 계산하면 식 (8)과 같다.

$$I_{c,rms}^2 = I_o^2 \frac{1-2D}{12(1-D)^2} \left( 12 + \frac{r^2}{4} \frac{(1-2D)^2}{(1-D)^2} \right) + I_o^2 \frac{2D}{12(1-D)^2} \left( 3 + \frac{r^2}{4} \frac{D^2}{(1-D)^2} \right) - I_o^2 \quad (8)$$

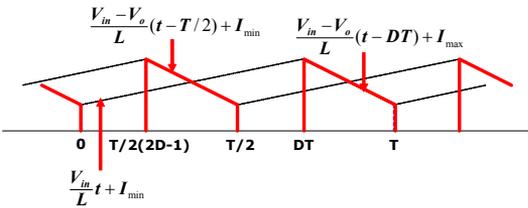


그림 3. 듀티가 0.5보다 클 때의 다이오드 리플전류  
Fig. 3 Diode ripple current when duty is larger than 0.5.

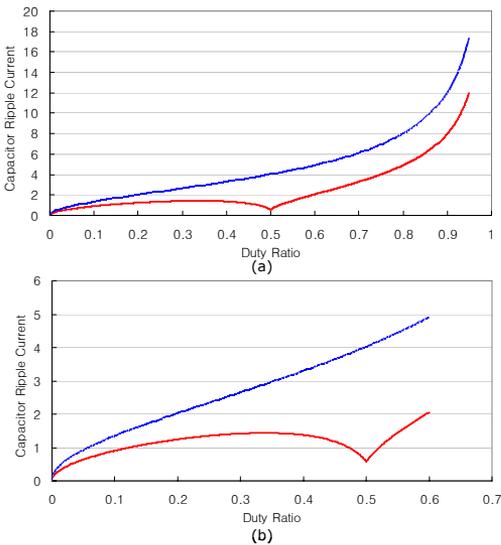


그림 4. 커패시터 리플전류의 비교  
Fig. 4 Comparison of capacitor ripple currents

2)  $0.5 \leq D \leq 1.0$ 인 경우

그림 3은 듀티가 0.5보다 클 때의 다이오드 리플전류를 보이고 있다. 여기에도 한 주기가 4부분으로 나뉘는데 각 직선의 수식을 그림에 써 놓았다. 이러한 수식들을 이용하여 커패시터의 리플 전류식을 계산하면 다음과 같다.

$$I_{c,rms}^2 = I_o^2 \frac{2(1-D)}{12(1-D)^2} \left( 3 + \frac{r^2}{4} \right) - I_o^2 \quad (9)$$

식 (8)과 (9)를 사용하여 커패시터의 리플전류를 그리면 그림 4와 같다. 두 그림에서 위의 곡선이 기존의 부스트 컨버터에서의 커패시터 리플전류이고 밑의 곡선이 2상 인터리브드 부스트 컨버터에서의 커패시터 리플전류이다. 듀티가 영 근처와 0.5근처에서 가장 작은 리플전류를 보이고 있으며 듀티가 0.5보다 커지면 듀티에 따라서 리플전류가 점점 더 커진다. 특히 0.8이상의 듀티에 대해서는 커패시터의 리플전류가 기하급수적으로 증가한다는 것을 알 수 있다.

### III. 3상 인터리브드 부스트 컨버터의 출력전류

그림 5는 3상 인터리브드 부스트 컨버터를 보이고 있는데 출력측 다이오드 3개의 전류가 합쳐져서 출력측 다이오드 전류를 만들고 있다. 따라서 앞에서도 언급하였듯이 3개의 구간으로 나누어서 분석해야 한다.

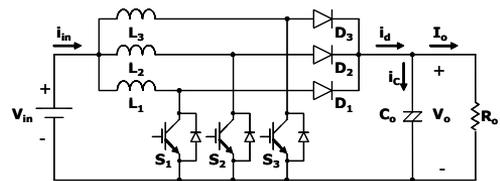


그림 5. 3상 인터리브드 부스트 컨버터 회로 [5]  
Fig. 5 3 phase interleaved boost converter circuit [5]

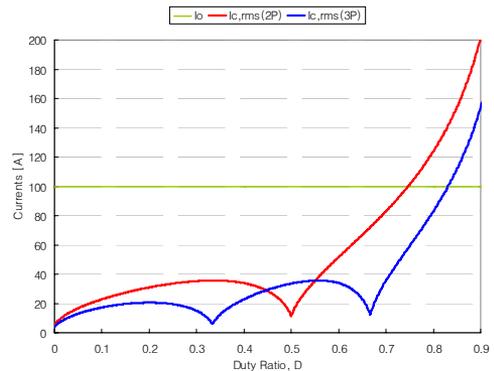


그림 6. 2상과 3상에 대한 커패시터 리플전류  
Fig. 6 Capacitor ripple current for 2 phase and 3 phase

1)  $0 \leq D \leq 1/3$ 인 경우

이 구간의 분석도 2상에서 했듯이 비슷하게 4개의 전류를 계산해서 커패시터의 리플전류를 계산하면 된다. 결과식만 써보면 다음과 같다.

$$I_{c,rms}^2 = I_o^2 \frac{(1-3D)}{27(1-D)^2} \left( 27 + \frac{r^2}{4} \frac{(1-3D)^2}{(1-D)^2} \right) + I_o^2 \frac{D}{9(1-D)^2} \left( 12 + \frac{r^2}{4} \frac{D^2}{(1-D)^2} \right) - I_o^2 \quad (10)$$

2)  $1/3 \leq D \leq 2/3$ 인 경우

이 구간의 분석도 2상에서 했듯이 비슷하게 다이오드 전류 중 4개의 전류를 계산해서 커패시터의 리플전류를 계산하면 된다. 결과식만 써보면 다음과 같다.

$$I_{c,rms}^2 = I_o^2 \frac{(2-3D)}{9(1-D)^2} \left( 4 + \frac{r^2}{27} \frac{(2-3D)^2}{(1-D)^2} \right) + I_o^2 \frac{(3D-1)}{9(1-D)^2} \left( 1 + \frac{r^2}{108} \frac{(3D-1)^2}{(1-D)^2} \right) - I_o^2 \quad (11)$$

3)  $2/3 \leq D \leq 1$ 인 경우

이 구간은 2상의 마지막 구간같이 각 다이오드의 전류가 따로따로 더해져서 나타난다. 결과식만 써보면 다음과 같다.

$$I_{c,rms}^2 = I_o^2 \frac{1}{3(1-D)} \left( 1 + \frac{r^2}{12} \right) - I_o^2 \quad (12)$$

이상의 결과를 그림으로 표현하면 그림 6과 같다. 2상에 비해서 좀 더 아래에 위치한 곡선이 3상에 대한 커패시터 리플전류인데 듀티 0.5 근처의 일부 구간에서는 오히려 3상이 2상보다 리플전류가 더 크다. 따라서 회로를 2상으로 설계할 지 3상으로 설계할 지를 결정할 때 사용하는 듀티의 영역을 따져봐야 한다.

#### IV. 4상 인터리브드 부스트 컨버터의 출력전류

4상에 대한 수식유도도 앞서 해석한 2상과 3상에서 처럼 각 구간별 수식을 구하면 되는데 4상의 경우는 4개의 구간으로 나누어서 수식을 구해야 한다. 그래서 일단은 첫 번째 구간과 마지막 구간에 대한 수

식을 다음과 같이 구해보았다.

$$I_{c,rms}^2 = I_o^2 \frac{(1-4D)}{48(1-D)^2} \left( 48 + \frac{r^2}{4} \frac{(1-4D)^2}{(1-D)^2} \right) + I_o^2 \frac{9D}{48(1-D)^2} \left( 12 + r^2 \frac{D^2}{(1-D)^2} \right) - I_o^2 \quad (13)$$

$$I_{c,rms}^2 = I_o^2 \frac{1}{4(1-D)} \left( 1 + \frac{r^2}{12} \right) - I_o^2 \quad (14)$$

#### V. 커패시터 리플전류의 일반화

이상의 결과를 이용하여 각 수식들의 규칙성을 파악해서 커패시터 리플전류의 수식에 대한 일반화를 하려고 한다. 먼저 각 상의 수를 P로 표현하고 수식을 정리하였다.

1)  $0 \leq D \leq 1/P$ 인 경우

앞에서 유도한 수식들 중 (8), (10) 그리고 (13)의 규칙성을 정리하면 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$I_{c,rms}^2 = I_o^2 \frac{(1-PD)}{3P^2(1-D)^2} \left( 3P^2 + \frac{r^2}{4} \frac{(1-PD)^2}{(1-D)^2} \right) + I_o^2 \frac{D}{12(1-D)^2} \frac{(P-1)^2}{P} \left( 12 + r^2 \frac{D^2}{(1-D)^2} \right) - I_o^2 \quad (15)$$

2)  $(P-1)/P \leq D \leq 1$ 인 경우

이 구간은 각 상에서 마지막 구간으로 식 (9), (12) 그리고 (14)에 해당된다. 이 3식의 규칙성을 찾아보면 다음과 같다.

$$I_{c,rms}^2 = \frac{I_o^2}{P(1-D)} \left( 1 + \frac{r^2}{12} \right) - I_o^2 \quad (16)$$

3)  $1/P \leq D \leq 2/P$ 인 경우

이 경우는 식 (11)과 (15)로부터 유추해보면 다음과 같이 일반식을 쓸 수 있다.

$$I_{c,rms}^2 = I_o^2 \frac{(2-PD)(P-1)^2}{3P^2(1-D)^2} \left( 3 + \frac{1}{P^2} \frac{r^2}{4} \frac{(2-PD)^2}{(1-D)^2} \right) + I_o^2 \frac{(PD-1)(P-2)^2}{3P^2(1-D)^2} \left( 3 + \frac{1}{P^2} \frac{r^2}{4} \frac{(PD-1)^2}{(1-D)^2} \right) - I_o^2 \quad (17)$$

4)  $2/P \leq D \leq 3/P$ 인 경우

이 경우는 식 (17)로부터 다음과 같이 쉽게 유추할 수 있다.

$$I_{c,rms}^2 = I_o^2 \frac{(3-PD)(P-2)^2}{3P^2(1-D)^2} \left( 3 + \frac{1}{P^2} \frac{r^2 (3-PD)^2}{4(1-D)^2} \right) + I_o^2 \frac{(PD-2)(P-3)^2}{3P^2(1-D)^2} \left( 3 + \frac{1}{P^2} \frac{r^2 (PD-2)^2}{4(1-D)^2} \right) - I_o^2 \quad (18)$$

이상의 결과를 통합해서 일반식으로 표현하면 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$I_{c,rms}^2 = \frac{I_o^2}{P^2(1-D)^2} (A+B) - I_o^2 \quad (19)$$

$$A = (N-PD)(P-N+1)^2 \left( 1 + \frac{1}{P^2} \frac{r^2 (N-PD)^2}{12(1-D)^2} \right) \quad (20)$$

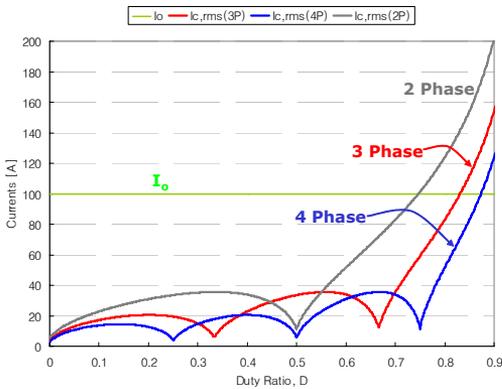


그림 7. 4상까지의 리플전류의 비교  
Fig. 7 Comparison of ripple currents to 4 phase

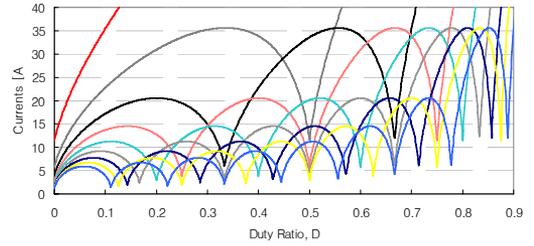
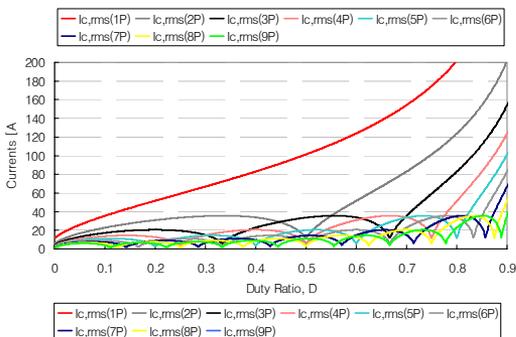


그림 8. 9상까지의 리플전류의 비교  
Fig. 8 Comparison of ripple currents to 9 phase

$$B = (PD-N+1)(P-N)^2 \left( 1 + \frac{1}{P^2} \frac{r^2 (PD-N+1)^2}{12(1-D)^2} \right) \quad (21)$$

여기서 N은 각 구간을 나타내는 값으로 2상은 1과 2이고 3상은 1, 2, 3이며 4상은 1, 2, 3 그리고 4이다.

그림 7은 4상까지의 커패시터 리플전류를 비교한 그래프인데 3상에 비해서 전반적으로 낮아지지만 일부 영역에서는 오히려 증가하는 것을 알 수 있다. 따라서 앞에서도 언급했듯이 상 수를 선택할 때 사용하는 듀티의 범위를 고려해야 한다.

그림 8은 앞에서 일반화한 수식을 이용하여 9상까지의 출력 커패시터 리플전류를 비교한 그래프이다. 상 수를 늘리면 늘릴수록 리플전류가 줄어든다는 것은 확인할 수 있다. 또한 이러한 그래프가 회로를 설계할 때 몇 상을 사용할 지 결정할 수 있는 하나의 기준으로 사용할 수 있을 것으로 판단된다.

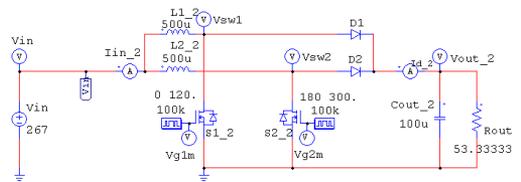


그림 9. 2상 모의실험 회로  
Fig. 9 2-phase simulation circuit

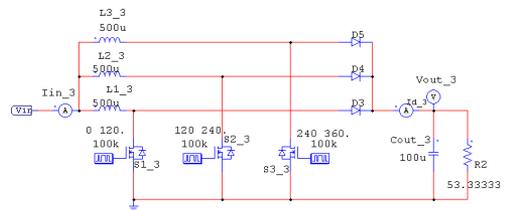


그림 10. 3상 모의실험 회로  
Fig. 10 3-phase simulation circuit

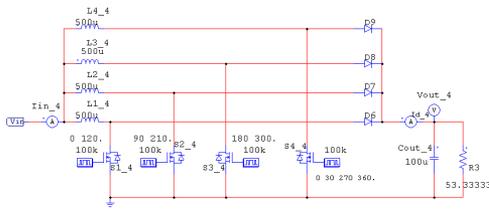


그림 11. 4상 모의실험 회로  
Fig. 11 4-phase simulation circuit

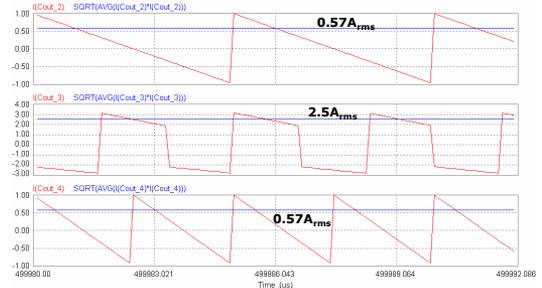


그림 13. D=0.5일 때 각 전류파형  
Fig. 13 Each current waveform when D=0.5

### VI. 모의 실험

앞에서 유도하고 일반화한 수식들을 확인하기 위해서 한국파워십의 PSIM 6.1을 사용하여 모의실험을 하였다. 입력은 가변이지만 출력은 400[V]로 고정하였으며 출력전력도 3[kW]로 고정된 상태에서 입력전압과 듀티를 가변해서 모의실험을 하였다.

그림 9, 그림 10 그리고 그림 11은 본 모의실험에 사용된 회로도이다. 동작주파수는 100[kHz]로 하였으며 그림 7에서 듀티가 0.33일 때와 0.5일 때를 모의실험하였다. 그림 12는 듀티가 0.33일 때의 모의실험 파형으로 그림 7에서도 알 수 있듯이 3상 방식일 때가 0.51[A]로 가장 작은 리플전류를 갖는 다는 것을 확인할 수 있다. 2상인 경우가 가장 큰 리플전류를 갖는 다는 것을 알 수 있다. 하지만 그림 13은 듀티가 0.5일 때인데 이 경우는 2상과 4상이 거의 유사한 리플전류 값을 갖는다는 것을 알 수 있으며 3상의 경우가 가장 큰 리플전류를 갖는다는 것을 확인할 수 있다. 2상과 4상의 경우는 0.57[A]로 상당히 작은 리플전류를 가지며 3상의 경우는 2.5[A]로 상당히 큰 리플전류를 갖는다는 것을 볼 수 있다.

### VII. 결론

본 논문에서는 전기자동차나 신재생에너지 분야에서 많이 사용되는 DC-DC 컨버터인 인터리브드 부스트 컨버터의 출력 커패시터에 흐르는 리플 전류의 수식을 유도하고 이를 일반화 하였다. 자세한 분석을 통해서 각 리플전류에 대한 수식을 유도하고 이러한 수식들의 유사성을 이용하여 리플전류의 수식을 일반화 하였다. 이를 확인하기 위해서 PSIM을 활용한 모의실험을 하였고 분석한 내용과 일치한다는 것을 확인 하였다.

이러한 데이터는 향후 상 수를 결정하기 위해서 고민하는 연구자들에게 하나의 가이드 역할을 할 수 있을 것으로 판단된다.

### 감사의글

이 논문은 2012년 남서울대학교 교내 연구비 지원에 의하여 연구되었음

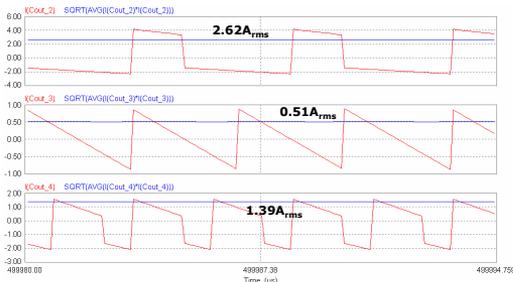


그림 12. 각 상별 리플전류 및 rms전류  
Fig. 12. ripple current and rms current for each phase

### 참고 문헌

- [1] T. Ishii and Y. Mizutani, "Power factor correction using interleaving technique for critical mode switching converters", IEEE Power Electronics Specialists Conf. (PESC), pp. 905-910, 1998.
- [2] T. Ishii and Y. Mizutani, "Variable frequency switching of synchronized interleaved switching converters", U.S. Patent 5, 905, 369, 1999.

- [3] 고윤석, "스마트 그리드 지원을 위한 컴퓨터 기반 3상 전력 데이터 수집 솔루션 개발", 한국전자통신학회논문지, 6권, 4호, pp. 553-558, 2011.
- [4] 이정석, "전자제어 장치를 이용한 세라믹 파이프의 온수제어기 개발", 한국전자통신학회논문지, 6권, 5호, pp. 717-722, 2011.
- [5] 정용채, "다단 인터리브드 부스트 컨버터의 입력리플전류 수식 분석", 한국전자통신학회논문지, 6권, 6호, pp. 865-872, 2011.

### 저자 소개



#### **정용채(Yong-Chae Jung)**

1989년 2월 한양대학교 전자공학과 (공학사)

1991년 2월 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 (공학석사)

1995년 8월 한국과학기술원 전기 및 전자공학과(공학박사)

1991년 8월~1999년 6월 LG전자 홈어플라이언스연구소 선임연구원

1999년~현재 남서울대학교 전자공학과 교수

※ 관심분야 : 전력전자, DC-DC 컨버터, 태양광 발전, 전기자동차, PFC 회로, EMI, 유도가열