

# 펄스 폭 변조-영전류 천이 승압형 컨버터에서 보조 스위치의 도통 손실을 줄이기 위한 공진 파라미터 설계

황지훈, 소재환, 김래영<sup>†</sup>  
한양대학교

## Novel Design with Decreasing Conduction Loss in Auxiliary Switch for ZCT PWM Boost Converter

Ji-Hoon Hwang, Jae-Hwan Soh, Rae-Young Kim<sup>†</sup>  
Hanyang University

### ABSTRACT

본 논문에서는 펄스폭 변조 영전류 천이 (PWM-ZCT) 승압형 컨버터에서 보조 회로로 흐르는 전류로 인한 도통 손실을 최소화 할 수 있는 공진 파라미터 최적화 방안을 제시한다. 제안된 해석을 통한 소프트 스위칭 기술 적용 시 추가적으로 발생한 보조 회로의 도통 손실을 최소화할 수 있다. 시뮬레이션 결과를 통하여 제안된 해석의 타당성을 입증 하였다.

### 1. 서론

최근 산업계에서는 컨버터의 소형화, 경량화 요구에 따라 고 주파수 스위칭 동작이 요구 되고 있다. 이러한 스위칭 동작은 높은 스위칭 손실로 인한 전체적인 효율 감소를 야기할 수 있다. 이러한 손실을 저감하기 위하여 컨버터에 적용 가능한 다양한 방법이 소개되고 있다. 그 중 하나의 방법이 커패시터 와 인덕터 의 공진을 이용한 소프트 스위칭 기법이다<sup>[1]-[2]</sup>. 소프트 스위칭의 적용 시 주 스위치에서의 스위칭 손실은 줄어들지만, 수반되는 보조 공진 회로로 인하여 보조 회로에서의 도통 손실은 증가할 수 있고 증가하는 도통 손실에 대한 논의가 충분하지 않았다. 이러한 현상을 완화하기 위하여, 본 논문에서는 펄스폭 변조 영전류 천이 승압형 컨버터의 보조 공진 회로의 도통 손실이 최소가 되도록 보조 커패시터  $C_r$  과 보조 인덕터  $L_r$  값 선정 방법을 제시한다. 먼저 제한 조건을 통해서  $C_r$ ,  $L_r$  의 값이 존재할 수 있는 범위를 정한 후 그 범위 내에서 도통 손실을 최소화 하기 위한 방법을 제시한다. 본 논문에 사용된 펄스폭 변조 영전류 천이 (PWM-ZCT) 승압형 컨버터는 그림 1과 같다.

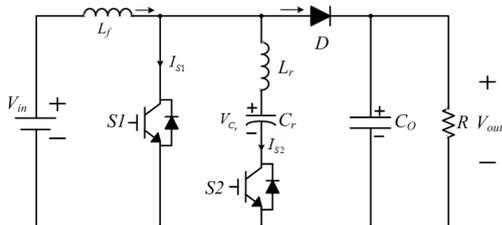


Fig. 1. PWM ZCT 승압형 컨버터

### 2. 도통 손실을 최소화하는 $C_r$ 과 $L_r$ 선정

#### 2.1 $C_r$ , $L_r$ 값 제한 범위

보조 회로의 최소 도통 손실 지점을 찾기 전에  $C_r$ ,  $L_r$  값이 존재할 수 있는 범위를 다음의 3가지 조건을 통하여 제한하였다

##### 2.1.1 $C_r$ , $L_r$ 값의 최대, 최소 제한

기생성분 크기는 일정하지 않기 때문에 본 논문에서 제시한 설계 기준에는 반영될 수 없으며  $C_r$ ,  $L_r$  값은 기생 인덕턴스 값과 기생 커패시턴스 값 보다는 충분히 커야 한다. 본 논문에서는  $C_r$ ,  $L_r$  최소값은 여유를 주기 위해 기생성분에 10배로 선정하였다. 출력 커패시터  $C_o$  와 입력 인덕터  $L_f$  를 각각 전압 원, 전류 원으로 해석하기 위해서  $C_r$ ,  $L_r$  이 출력 커패시터  $C_o$ , 입력 인덕터  $L_f$  보다 충분히 작도록 선정하였다. 본 논문에서는  $C_r$ ,  $L_r$  최대값은 출력 커패시터  $C_o$ , 입력 인덕터  $L_f$  의 0.1배로 선정하였다. 이를 정리하면 (1)과 같다.

$$10L_p \leq L_r \leq 0.1L_f, 10C_p \leq C_r \leq 0.1C_o \quad (1)$$

##### 2.1.2 공진 주파수 $\omega_r$ 의 제한 조건

공진주파수  $\omega_r$  의 범위는 주 스위치의 시비율 제한 조건으로부터 결정된다. 주 스위치의 안정적인 구현이 이루어지기 위해서 주 스위치는 적어도  $3/4T_r$  시간 이상은 턴온 되어 있어야 한다.  $3/4T_r$  시간 중  $1/4T_r$  시간은 주 스위치로 흐르는 전류  $I_{S1}$ 가 보조 스위치로 흐르게 하는 시간이며  $2/4T_r$  시간은 주 스위치 영전류 천이 구현을 위해  $C_r$  의 전압  $V_{C_r}$  이 음이 될 때까지의 시간이다. 위와 같은 관계로부터 (2)와 같은 조건을 얻을 수 있고 이를  $\omega_r$  에 대해 정리하면 (3)과 같은 식을 얻을 수 있다.  $k_m$  은 비례상수로써 여유 값 이며,  $T_r$  은  $C_r$ ,  $L_r$  로 인한 공진 주기를 말한다.

$$\frac{1}{k_m} \cdot T_s \cdot D_{\min} \geq \frac{1}{4} \cdot T_r + \frac{1}{2} \cdot T_r = \frac{3}{4} \cdot \frac{2\pi}{\omega_r} \quad (2)$$

$$\omega_r \geq \frac{3 \cdot \pi \cdot k_m}{2 \cdot D_{\min} \cdot T_s} \quad (3)$$

### 2.1.3 특성 임피던스 $z_r$ 의 제한 조건

특성 임피던스  $Z_r = \sqrt{L_r/C_r}$  이 커질 수록  $I_{S2}$  는 줄어들게 되며, 주 스위치의 영전류 천이 구현을 위한 최소한의  $I_{S2}$  가 필요하다. 이로부터  $I_{S2}$  에 대한 제한 값  $I_{S2\_lim}$  와  $Z_r$  에 대한 관계를 식(4)와 같이 나타낼 수 있다.

$$0 \leq Z_r \leq Z_{r\_max} = \frac{V_{Cr}}{I_{S2\_lim}} \quad (4)$$

### 2.2 보조 스위치 도통 손실을 최소화 하는 $C_r, L_r$ 결정

앞에서 언급한 제한 조건을 통해  $C_r, L_r$  선정 범위를 제한하였다. 이를 나타낸 것이 그림 2 이다. 선정 범위 내에서 보조 스위치 도통 손실을 최소화 하는  $C_r, L_r$  을 선정하기 위하여 보조 스위치에 흐르는 전류 파형과 각 구간에서의 적분 값을 그림 3 과 Table 1 에 나타내었다. 보조 공진 회로에서 보조 스위치의 도통 손실은  $P_{loss}(t) = \int V_{ce(sat)}(t) \cdot I_{S2}(t) dt$  로 나타낼 수 있고  $V_{ce(sat)}(t)$  가 일정하다고 가정한다면,  $I_{S2}(t)$  와  $P_{loss}(t)$  가 비례적인 관계 있다고 생각할 수 있다.  $C_r, L_r$  과  $I_{S2}(t)$  관계로부터  $C_r$  값이 가장 작은 지점에서 도통 손실이 최소가 됨을 확인하였다.

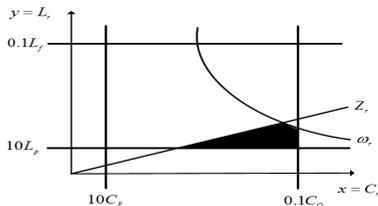


Fig. 2.  $C_r, L_r$  선정 가능 범위

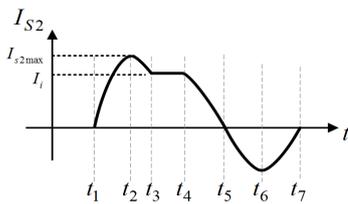


Fig. 3.  $I_{S2}$  전류파형

Table1  $I_{S2}$  전류 각 구간에서의 적분 값

$t_1 \sim t_3$	$t_4 \sim t_6$
$\sqrt{L_r \cdot C_r} \cdot I_{S2max} \{ \cos \omega (\sin^{-1} \frac{I_i}{I_{S2max}}) - 1 \}$	$3I_i \cdot \sqrt{L_r \cdot C_r}$

### 3. Simulation 결과

앞에서 제시한 수식으로  $C_r, L_r$  가변 시 손실 변화에 대한 추이를 확인해 보았다. 이를 위하여  $C_r$  값을 변경해 가며 손실을 계산하였다. 보조 회로의 도통 손실 최소 지점의  $C_r, L_r$  값은 제한 범위 내에서 두 소자 모두 가장 작은 값일 때 확인할 수 있다. 제안된 해석과 손실에 대한 추이가 일치함을 검증하기 위해 PSIM thermal module을 이용하였다. Table1의 수식으로부터  $C_r, L_r$  가변에 따른 손실추이에 대한 그래프를 그림 4에 나타내었으며 PSIM thermal module을 통한 손실을 그림 5에 나타내었다. 두 그래프 모두 x축은  $C_r$ , y축은  $L_r$ , z축은 보조 회로의 도통 손실을 나타낸다. 그림 4와 그림 5을 통해 손실변화 추이가 같음을 확인할 수 있으며 제안된 해석의 타당성을 검증할 수 있다.

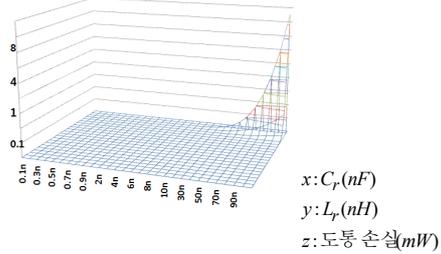


Fig. 4. 가정한 수식을 통해 얻은 도통 손실 그래프

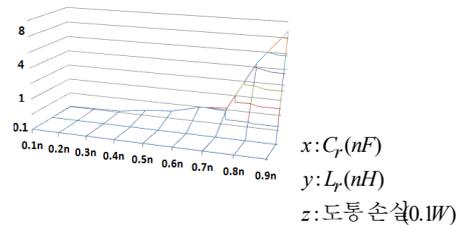


Fig. 5. PSIM 통해 얻은 도통 손실 그래프

### 4. 결론

본 논문에서는 주 스위치의 ZCT 적용 시 추가적으로 발생하는 보조 회로의 도통 손실을 최소화 하여 설계하는 방법에 대하여 제안하였다.  $C_r, L_r$  이 작아질수록 보조 회로의 도통 손실은 줄어들며  $L_r$  의 변화보다는  $C_r$  의 변화가 도통 손실 변화에 더 큰 영향을 미침을 확인 하였다. 제안된 해석을 적용하여 보조 스위치의 도통 손실을 최소화 하는  $C_r, L_r$  값을 찾을 수 있고 이를 통해 효율을 개선 시킬 수 있다.

### 참고 문헌

- [1]G.Hua, C. Leu, and F.C.Lee "Novel zero-voltage-transition PWM Converters," *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 9, pp.213-219, Mar. 1994.
- [2]J.W. Shin, S. K. Chae, and B. H. Cho, "A new zero-current-transitions boost converter using split inductors," in Proc. IP EMC, May 2009, pp. 534-539