

# 가변 듀티 제어 직렬 공진형 컨버터의 간략화 소신호 모델

박광민, 이귀준  
한국교통대학교

## A Simplified Small-Signal Model of Variable Duty Cycle Controlled Series Resonant Converter

Gwang-Min Park, Kui-Jun Lee  
Korea National University of Transportation

### ABSTRACT

본 논문은 직렬 공진형 컨버터의 가변 듀티 제어를 기반으로 한 간략화 소신호 모델을 제안한다. 직렬 공진형 컨버터는 일반적으로 일정한 출력 전압을 위해 듀티를 고정하고 주파수를 가변하여 제어한다. 하지만 이러한 방식은 경부하시에 효율을 저하시킨다. 따라서 본 논문은 이러한 경부하시에 가변 듀티 제어를 위한 소신호 모델을 간략화 하며 이를 전달함수로 도출하고, Matlab과 PLECS로 시뮬레이션 하여 검증하고 전달함수를 기반으로 제어를 설계하여 PSIM으로 시뮬레이션을 하였다.

주파수가 증가하게 되고, 이에 따라 스위칭 손실이 증가하게 되어 효율이 저하된다. 따라서 경부하의 동작 상황에서는 스위칭 주파수를 고정시키고 듀티를 가변시키는 제어방식이 필요하게 된다.

본 논문은 기존 EDF(Extended Describing Function)를 기반으로 한 연속전도모드(Continuous Conduction Mode, CCM)에서의 소신호 모델링을<sup>[1]</sup> 5차항에서 3차항을 가진 소신호 모델로 간략화하고<sup>[2]</sup>, 해석적인 방법을 통해 듀티 제어-출력(Control-to-Output) 전달함수를 도출하여 Matlab과 PLECS로 주파수 응답을 검증하였고, 이것을 기반으로 한 제어를 설계하여 PSIM으로 시뮬레이션을 하였다.

### 1. 서론

최근 신재생에너지, 전기자동차용 충전기, ESS 등을 위한 고효율, 고밀도 전력의 DC/DC 컨버터의 중요성이 높아짐에 따라 최근 공진형 컨버터의 연구가 활발하게 이루어지고 있다. 직렬 공진형 컨버터(Series Resonant Converter, SRC)는 공진회로의 인덕터와 커패시터가 직렬로 구성되어 영전압 스위칭(Zero Voltage Switching, ZVS) 또는 영전류 스위칭(Zero Current Switching, ZCS)으로 소프트 스위칭(Soft Switching)을 구현하여 스위칭 손실을 저감 시켜 고주파수 스위칭에서의 고효율, 고전력밀도의 토폴로지이며 회로는 그림 1과 같다.

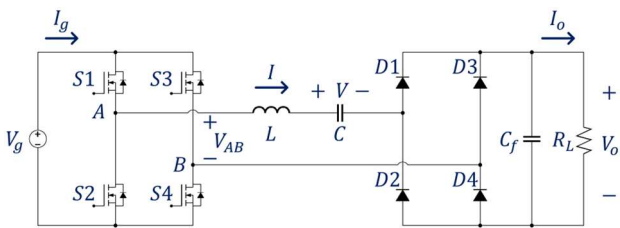


그림 1 풀-브리지 직렬 공진형 컨버터  
Fig.1 Full-Bridge Series Resonant Converter

직렬 공진형 컨버터는 듀티를 고정시키고 스위칭 주파수를 가변시켜 제어하거나, 스위칭 주파수를 고정시키고 듀티를 가변시키는 2가지 제어 방식을 사용한다. 일반적으로는 스위칭 주파수를 가변 시키지만 부하에 따라 첨예도 Q(Quality Factor)에 의해 동작점이 바뀌는 특성으로 인하여 경부하에서는 스위칭 주파수에 따른 전달비가 완만한 곡선이 됨에 따라 같은 동일한 전달비를 유지하기 위해서는 스위칭

### 2. 소신호 모델

#### 2.1 기존 소신호 모델

기존 소신호 모델은 그림 2와 같다. 풀-브리지 스위치에 의해 직류전압은 준-구형파로 변환되어 공진회로에 의해 사인파로 변환된다. 이를 푸리에 급수 기본파로 인덕터와 커패시터의 전압, 전류를 사인파 코사인 항으로 고조파를 근사화 시켜 모델링 되었다.

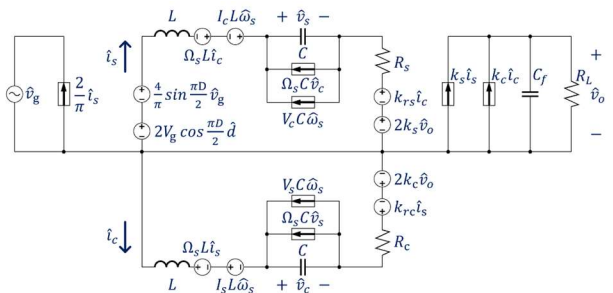


그림 2 기존 직렬 공진형 컨버터의 소신호 모델  
Fig.2 Original Small-Signal Model of Series Resonant Converter

기존 모델은 5차항을 가진 모델로 해석적인 방식으로 전달함수를 도출하기에는 힘들다. 그러므로 3차항으로의 소신호모델 변환이 필요하다.

## 2.2 간략화 소신호 모델

직렬 공진형 컨버터는  $\omega_m \ll \Omega_s$  인 조건에서 공진회로의 커패시터는 주파수에 따라 인덕터와 같이 동작한다. 따라서 커패시터와 병렬로 연결된 전류원을 인덕터와 임피던스로 합성시킬 수 있다. 간략화된 소신호 모델은 그림 3과 같다.

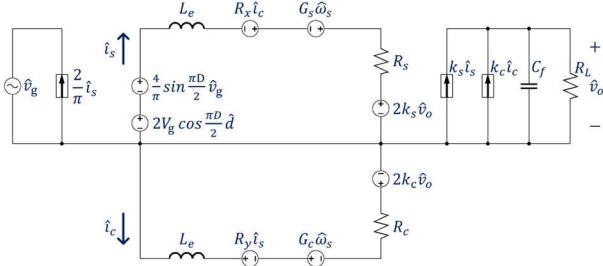


그림 3 간략화 직렬 공진형 컨버터 소신호 모델  
Fig.3 Simplified Small-Signal Model of Series Resonant Converter

## 2.3 듀티 제어-출력 전달함수 및 시뮬레이션

그림 3를 통해 듀티 제어-출력 전달함수를 도출하기 위해서는  $\hat{d}$ ,  $\hat{v}_o$  외에는 모두 테브난의 등가회로로 단락, 개방을 하여 정리한다. 도출된 식은 (1)과 같다.

$$\begin{aligned}
 X_{eq} &= \Omega_s L - \frac{1}{\Omega_s C}, & R_{eq} &= \frac{8}{\pi^2} R_L, & L_e &= L + \frac{1}{\Omega_s^2 C} \\
 R_s &= R_{eq} \frac{X_{eq}^2}{X_{eq}^2 + R_{eq}^2}, & R_c &= R_{eq} \frac{R_{eq}^2}{X_{eq}^2 + R_{eq}^2} \\
 k_s &= \frac{2}{\pi} \frac{R_{eq}}{\sqrt{R_{eq}^2 + X_{eq}^2}}, & k_c &= -\frac{2}{\pi} \frac{X_{eq}}{\sqrt{R_{eq}^2 + X_{eq}^2}} \\
 R_x &= \frac{X_{eq}^3}{X_{eq}^2 + R_{eq}^2}, & R_y &= X_{eq} \frac{X_{eq}^2 + 2R_{eq}^2}{X_{eq}^2 + R_{eq}^2} \\
 \frac{\hat{v}_o}{\hat{d}} &= \frac{(k_s 2V_g \cos(\frac{\pi D}{2})(sL_e + R_c) - k_c R_y 2V_g \cos(\frac{\pi D}{2}))R_L}{(1 + sC_f R_L)((sL_e + R_s)(sL_e + R_c) + R_x R_y) + (k_s(2k_s(sL_e + R_c) + 2k_c R_c) - k_c(2k_s R_y - 2k_c(sL_e + R_s)))R_L} \quad (1)
 \end{aligned}$$

시뮬레이션을 위한 시스템 파라미터 값은 표 1과 같다.

표 1 시스템 파라미터

Table 1 System parameters

Parameter	Value	Parameter	Value
$V_g$	400 V	$V_o$	200 V
$L$	197 $\mu$ H	$C$	51 nF
$C_f$	32 $\mu$ F	$R_L$	20 $\Omega$

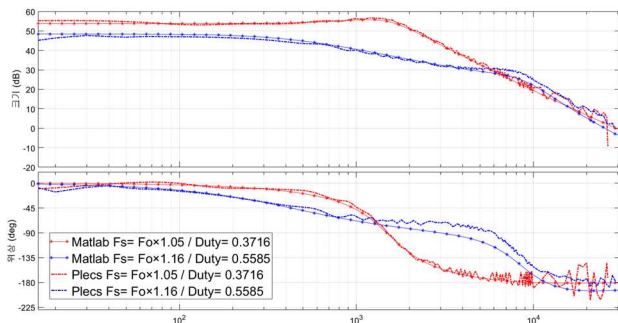


그림 4 듀티 제어-출력의 전압 주파수 응답  
Fig.4 Duty Control-to-Output of Voltage Frequency Response

그림 4 는 시뮬레이션 결과로 부하저항을 고정시키고 200V 의 출력전압으로 각각의 듀티와 스위칭 주파수에 따른 주파수 응답으로 Matlab 으로 시뮬레이션을 하고 PLECS 로 검증하였다. 비교 결과 둘의 결과는 거의 비슷하게 관찰되었고, 이를 기반으로 식 (2)와 같이 이상 보상기를 설계하였다.

$$G_c = 0.01 \times \frac{s+395.64}{s} \quad (2)$$

PSIM 으로 출력전압 지령값을 200V 로 고정하고 시간에 따라 부하저항을 가변시켜 시뮬레이션 하여 그림 5 와 같이 응답을 확인하였다.

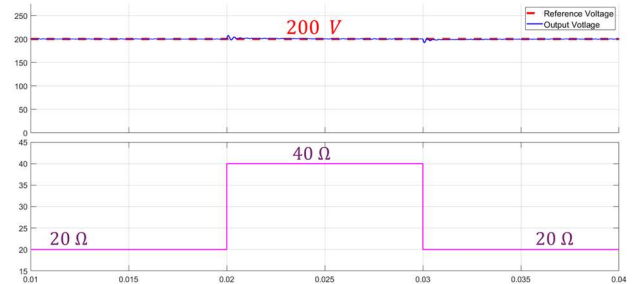


그림 5 PI 제어기의 듀티 가변제어 출력전압 응답  
Fig.5 PI Controller to Duty Variable Control of Output Voltage Response

## 3. 결론

본 논문으로 직렬 공진형 컨버터를 연속전도모드에서의 소신호 모델을 5차항에서 3차항으로 간략화 하고 이를 해석적인 방법으로 듀티 제어-출력 전달함수를 도출하여 어떤 값에 의해 출력전압이 결정되는지를 더 정확하게 이해하여 제어기 설계에 도움을 줄 수 있다.

본 연구는 2024년 한국교통대학교 지원을 받아 수행하였음.

## 참고 문헌

- [1] E. X. Yang, F. C. Lee and M. M. Jovanovic, "Small-signal modeling of series and parallel resonant converters," [Proceedings] APEC '92 Seventh Annual Applied Power Electronics Conference and Exposition, Boston, MA, USA, 1992, pp. 785-792
- [2] S. Tian, F. C. Lee and Q. Li, "A Simplified Equivalent Circuit Model of Series Resonant Converter," in IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 31, no. 5, pp. 3922-3931, May 2016