

# 듀티 가변 제어를 적용한 공진형 DC/DC 컨버터의 새로운 AC 등가 부하 모델링

유승희, 김동희, 이병국\*  
성균관대학교 정보통신대학

## Novel AC Equivalent Load Modeling for Resonant DC/DC Converter with Duty Adjusting Control Scheme

Seung-Hee Ryu, Dong-Hee Kim, and Byoung-Kuk Lee\*

College of Information & Communication Engineering, Sungkyunkwan University

### ABSTRACT

본 논문에서는 정전압 제어를 위해 듀티 제어 방식을 적용한 직렬 공진형 DC/DC 컨버터의 새로운 등가 부하 모델링을 제시함으로써 부하 변동에 따른 제어의 정밀도를 향상 시키고자 한다. PSIM 시뮬레이션 및 수식적 분석을 통해 기존 주파수 제어 방식에서의 등가 모델링과 듀티 제어 방식에서의 새로운 등가 모델링의 비교 분석을 통하여 제안한 방식의 타당성을 검증한다.

하지만, 해석의 편의상 듀티 가변 제어 방식에서도 기존 50% 고정 듀티 주파수 가변 제어 방식과 똑같은 등가 부하 모델링을 일반적으로 적용하여 기본파 성분을 가지고 해석하고 있으며 이는 DC/DC 컨버터 전압 이득을 추정하는데 오차를 발생시킬 수 있다<sup>[1],[2]</sup>.

본 논문은 듀티 가변 제어 방식을 적용한 직렬 공진형 DC/DC 컨버터에 있어 새로운 등가 부하 모델링을 제시함으로써 해석의 정밀도를 향상시키고자 하며 PSIM 시뮬레이션을 통해 새로운 모델링을 검증하고자 한다.

### 1. 서론

SMPS, 에너지 저장 장치 (ESS) 및 전기자동차용 충전기 등 정전압 출력을 목적으로 하는 응용분야에 적용되고 있는 DC/DC 컨버터 설계에 있어 가장 중요한 요소는 효율 증대와 더불어 소형 경량화라 할 수 있다. 따라서 고 스위칭 주파수를 통해 DC/DC 전력변환 장치의 주요 부품이면서, 전체 사이즈에서 큰 비중을 차지하는 수동소자인 인덕터 및 트랜스포머의 사이즈를 저감함으로써 전력밀도를 높일 수 있다. 하지만 증가된 스위칭 주파수는 전력 반도체소자의 스위칭 손실을 증가시켜 시스템 효율 저감의 원인이 된다. 이를 극복하기 위해 고주파수로 동작하면서 영전압 스위칭 (Zero Voltage Switching, ZVS)이 가능한 공진형 컨버터 적용이 주로 고려되고 있다. 공진형 토폴로지가 적용된 DC/DC 컨버터는 부하 변동에 대해 일정 출력 전압을 위해 50% 고정 듀티로 주파수를 가변하여 제어하는 것이 일반적이거나 직렬 공진형 컨버터 (Series Resonant Converter, SRC)인 경우에는 경부하 시 완전한 특성 곡선으로 스위칭 주파수 범위가 넓어지게 되며 이는 경부하 시 효율 저감의 원인이 된다. 이에 경부하 시 효율 저감을 극복하기 위해 부하 변동에 따라 주파수 가변과 동시에 듀티를 가변하는 제어방식이 적용될 수 있다<sup>[2]</sup>.

### 2. 본론

#### 2.1 시스템 구성

본 논문의 해석은 풀 브릿지 타입의 직렬 공진형 DC/DC 컨버터를 이용할 것이며, 그림 1에 나타낸 바와 같이 구형파 발생부, 공진 네트워크 및 2차 정류부로 구성되어 있다. 그림 2는 듀티 가변 제어가 적용되었을 때의 동작 파형을 나타낸다.

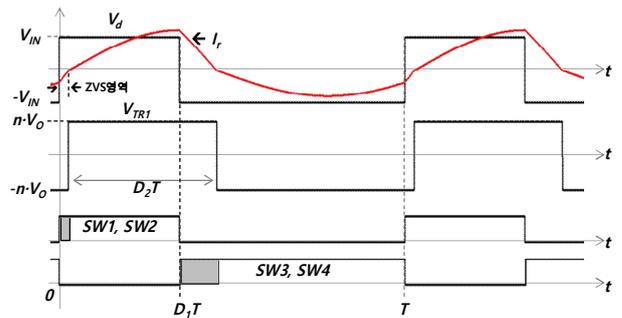


그림 2 듀티 가변 제어 시 컨버터의 주요 동작 파형  
Fig. 2 Main Operating Waveforms in the Converter at Duty Adjusting Control

#### 2.2 새로운 AC 등가 부하 모델

그림 2의 동작 파형에서 확인 할 수 있듯이 공진 네트워크 입력 구형파 전압의 듀티 가변 시 트랜스포머 2차 측으로 전달되는 구형파 전압의 듀티가 동일하지 않게 된다. 이는 공진 네트워크 임피던스에 의한 전류 지연으로 인해 1차 측 순환전류 발생과 듀티 가변 제어에 의한 정(+)·부(-) 전류의 불균형에 기인하는 것이다. 따라서, 듀티 가변 제어 시 해석의 정확성을 높이기 위해서는 2차 측으로 전달되는 구형파 전압의 듀티를 고려하여 AC 등가 저항을 도출할 필요가 있다.

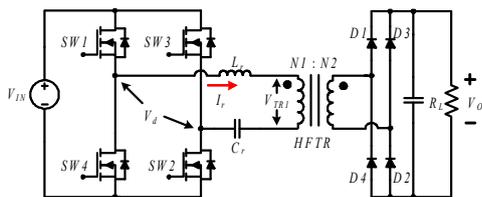


그림 1 풀 브릿지 직렬 공진형 DC/DC 컨버터  
Fig. 1 A Full-bridge Series Resonant DC/DC Converter

### 2.2.1 듀티 변화에 의한 등가 저항 값

DC/DC 컨버터 동작 특성 상 부하 변동에 출력 전압은 일정하게 제어되어야 한다. 또한, 기존의 50% 고정 듀티 주파수 가변 제어 방식 대비 듀티 가변 제어 방식에서는 임의의 한 부하에 대해 일정 전압을 출력 할 수 있는 동작 주파수와 듀티의 다양한 조합이 가능하다. 따라서, 2차 측 정류다이오드 입력에서의 등가 저항 값은 듀티에 따른 함수로 표현될 수 있다. (1)식은 2차 측에 투영된 듀티를 고려한 전압, 전류의 기본과 성분 크기를 이용한 AC 등가 저항 값에 대한 유도식을 보여준다.

$$R_{ac} = \frac{8}{\pi^2} \sin^2(\pi D_2) R_o \quad (1)$$

(2)식은 듀티를 고려한 등가 저항이 적용된 회로에서의 Quality Factor이다. (2)식을 다시 정리하면 기존 50% 고정 듀티 주파수 가변 제어 방식에서의 Quality Factor,  $Q_{D=0.5}$ 와의 표준화 된 식으로 표현될 수 있다. (3)식은 직렬 공진형 DC/DC 컨버터 전압 이득 식이 된다.

$$Q = \frac{\pi^2 \cdot Z_o}{n^2 \cdot 8 \cdot \sin^2(\pi D_2) \cdot R_o} = Q_{D=0.5} \frac{1}{\sin^2(\pi D_2)} \quad (2)$$

$$\frac{V_{Rac}^F}{V_{d@0.5}^F} = \frac{\sin(\pi D_1)}{\sqrt{1 + Q^2 \cdot \left(\omega_n - \frac{1}{\omega_n}\right)^2}} \quad (3)$$

여기서,  $n(=N_p/N_s)$ 은 턴 수비,  $Z_o(= \sqrt{L_r/C_r})$ 은 공진 특성 임피던스,  $D_1, D_2$ 은 1,2차 측 구형파 입력 전압의 듀티,  $\omega_n$ 은 공진 주파수이다.

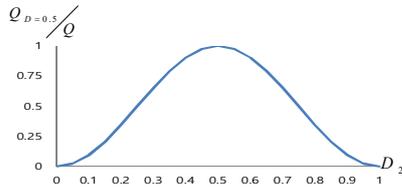


그림 3 공진 등가 회로의 표준화 된 첨예도  
Fig. 3 Normalized Quality Factor of Resonant Equivalent Circuit

그림 3를 보면 듀티가 작아질수록 듀티가 50%일 때 보다 Quality Factor값이 커지는 것을 확인할 수 있다. 이는 1차 측으로 투영된 등가 저항 값이 듀티가 50%일 때의 등가 저항 값보다 작아진다는 것을 의미 한다.

### 2.2.2 2차 측으로 전달되는 듀티 계산

앞에서 언급했듯이 순환전류 및 전류의 불균형에 의해 듀티 가변 제어 시 2차 측으로 전달되는 구형파 전압의 듀티인  $D_2$ 는 1차 측 공진 네트워크 구형파 입력 전압의 듀티  $D_1$ 보다 커지게 된다. 컨버터의 출력 전압은 고정되어 있기 때문에  $D_2$ 은 1차 측 공진 인덕턴스와 커패시턴스를 2차 측으로 변환하여 기본과 성분에 대해 해석함으로써 (4)식을 구할 수 있다.

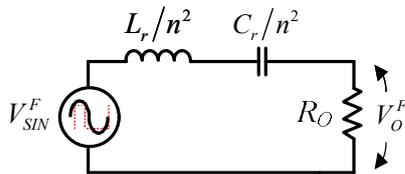


그림 4 2차 측으로 환원한 등가 회로  
Fig. 4 Equivalent Circuit reflected to Secondary Side

$$Q_{ref} = \frac{Z_{ref}(=Z_o)}{R_o} : 2차 측으로 환원된 Quality Factor$$

$$\omega_{n,ref} = \frac{1}{n^2} \frac{\omega_{sw}}{\omega_o} = \frac{\omega_n}{n^2} : 2차 측으로 환원된 주파수 비$$

$$D_2 = \frac{1}{\pi} \sin^{-1} \left\{ \frac{\pi}{4} \sqrt{1 + Q_{ref}^2 \cdot \left(\omega_{n,ref} - \frac{1}{\omega_{n,ref}}\right)^2} \right\} \quad (4)$$

### 2.2.3 시뮬레이션 결과

PSIM 시뮬레이션을 위한 파라미터 값들은 표 1과 같으며, 트랜스포머가 적용된 실제 회로와 기존 50% 고정 듀티 제어에서의 등가 저항 모델링 및 제안한 듀티 가변 제어에서의 등가 저항 모델링에 대해 전압 이득 비를 비교하였다. 또한, 그림 5을 보면 입·출력 전압의 듀티가 계산 식과 동일함을 확인할 수 있다.

표 1 시스템 파라미터  
Table 1 System Parameters

Parameter	Value	Parameter	Value
fsw	175.2kHz	V <sub>in</sub>	380 [V <sub>dc</sub> ]
R <sub>O</sub>	400 [Ω]	N <sub>1</sub> :N <sub>2</sub> (n)	19:26(0.731)
L <sub>r</sub>	75 [μH]	C <sub>r</sub>	66 [nF]
D <sub>1</sub>	0.26	D <sub>2</sub>	0.32

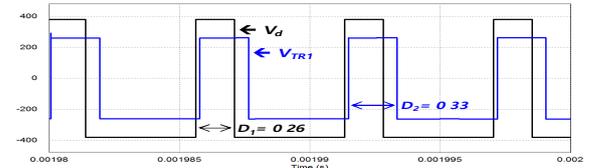


그림 5 입 출력 전압 파형 및 듀티  
Fig. 5 Input and Output Voltage Waveforms and Duty

표 2 시뮬레이션 결과  
Table 2 Simulation Results

Parameter	실제 회로	기존 모델링	제안 모델링
전압 이득	0.809	0.929	0.869

## 3. 결론

본 논문에서는 비대칭 듀티 가변 제어 방식을 적용한 직렬 공진형 DC/DC 컨버터 해석 시 듀티를 고려한 등가 부하 저항 값을 도출하는 새로운 등가 모델링을 제안하였으며, 시뮬레이션 결과를 통해 기존 모델링 대비 해석의 정밀도가 50% 정도 향상되는 것을 표 2에서 확인할 수 있다.

## 참고 문헌

- [1] R. L. Steigerwald, "A comparison of half bridge resonant converter topologies", *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 3, No. 2, pp. 174-182, Apr. 1988.
- [2] Praveen K. Jain, Andre St Martin, and Gary Edwards, "Asymmetrical Pulse Width Modulated Resonant DC/DC Converter Topologies", *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 11, no. 3, pp.413-422, May 1996.