

# 부하특성을 고려한 마그네트론 구동용 PS FB-ZVS PWM 컨버터의 설계

이완윤, 정교범, 신판석  
홍익대학교

## A Design of PS FB-ZVS PWM Converter with Magnetron Load

Wan-Yun Lee, Gyo-Bum Chung, Pan-Seok Shin  
Hongik University

### ABSTRACT

The conventional 60[Hz] power supply for driving magnetron in microwave oven has disadvantages of heavy weight and low efficiency due to 60[Hz] High Voltage Transformer(HVT), capacitor and the phase control of thyristors with open-loop controller. To alleviate these disadvantages, this paper proposes a 20[kHz] phase-shifted(PS) Full-Bridge(FB) Zero-Voltage-Switched(ZVS) PWM converter to drive a 600[W] magnetron in an 1[kW] microwave oven and to control the average anode current.

### 1. 서 론

일반적인 생활 가전제품으로 자리잡고 있는 전자레인지는 대부분 무게와 비중이 큰 성층 철심형 고전압 변압기(HVT:High Voltage Transformer)와 약 1[uF] 용량의 고압 콘덴서 및 정류 다이오드로 구성된 배압회로를 이용하여 4000[V]로 승압하여 마그네트론(Magnetron)을 구동시킨다. 이 방법은 무게와 비중이 큰 성층 철심형 HVT와 고압 콘덴서로 인하여 전자레인지의 중량증가 및 저효율의 단점이 있다. 또한 일반적인 가정용 전자레인지는 마그네트론의 양극전류를 일정하게 제어할 수 있는 장치를 갖고 있지 않다.

그러나 산업용 마이크로웨이브 발생장치는 마그네트론의 출력을 특정값에서 일정하게 조절하기 위한 마그네트론 양극전류 제어장치가 필요하다. 따라서 본 논문은 마이크로웨이브를 발생시키는 마그네트론의 구동을 위해 전력용 스위칭 소자 IGBT를 이용한 20[kHz]의 스위칭 주파수를 가지는 Phase-shifted FB-ZVS PWM 컨버터의 사용을 제안하며<sup>[1]</sup>, 마그네트론의 출력을 일정하게 조절하기 위한 양극전류 평균값 제어를 설계하고 컴퓨터 시뮬레이션을 통하여 이의 타당성을 보인다.

### 2. 마그네트론

#### 2.1 마그네트론의 특성

마그네트론은 60[Hz]의 상용전원을 사용할 경우, 음극과 양극사이에 3.7~3.8[kV]의 Cut-off 전압 이상을 인가하면 2450[MHz]의 마이크로웨이브를 발생시킨다. 그리고, 마그네트론 음극이 전자를 방출하기 위해서는 필라멘트에 약 3.3[V]를 인가해야 하며, 이 때 0.3[A]의 양극전류가 흐른다.

#### 2.2 마그네트론의 등가회로

그림 1은 마그네트론의 등가회로이다. 마그네트론은 전류의 방향을 결정하기 위한 다이오드 D, Cut-off 전압을 나타내는 제너다이오드  $D_z$ 로 등가화될 수 있다.<sup>[1]</sup> 마그네트론은 발진하기 전에는 저항  $R_0$ 로 취급되며, 음극에 Cut-off전압 이상을 인가하여 발진한 후에는 양극에서 음극으로 전류가 흐르며, 저항  $R_1$ 의 값을 갖는다.

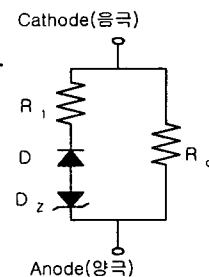


그림 1 마그네트론의 등가회로  
Fig. 1 Equivalent circuit of Magnetron

### 3. PS FB-ZVS PWM 컨버터의 소신호 모델 및 평균 양극전류 제어기

#### 3.1 PS FB-ZVS PWM 컨버터의 소신호 모델

그림 2는 본 논문에서 제안한 마그네트론 구동용 Phase-shifted FB-ZVS PWM 컨버터의 회로도이다. 그

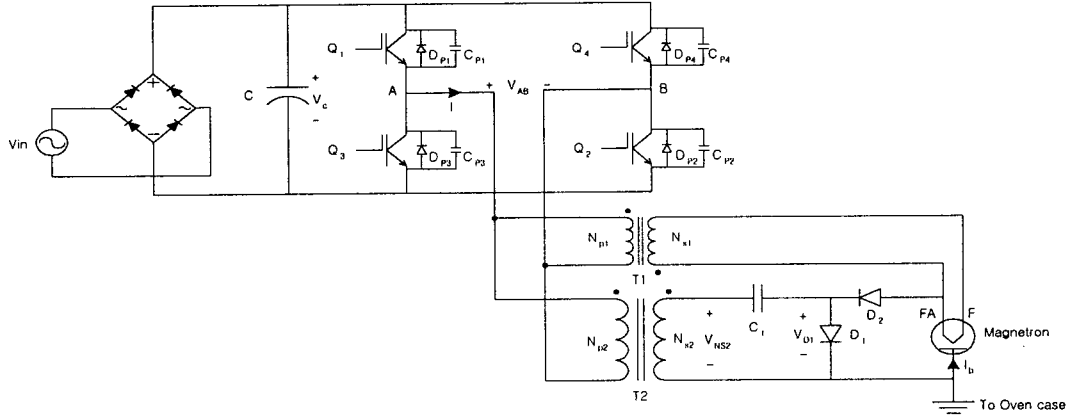


그림 2 마그네트론 구동용 PS FB-ZVS PWM 컨버터의 전체 주회로도  
Fig. 2 Main circuit of PS FB-ZVS PWM Converter for driving Magnetron

그림 3은 마그네트론 구동용 전원장치의 고주파 변압기 T1과 관련된 회로는 생략하고 고주파 고압변압기(High Frequency High Voltage Transformer: HFHVT) T2와 관련된 회로의 소신호 모델<sup>[2]</sup>을 나타낸다.

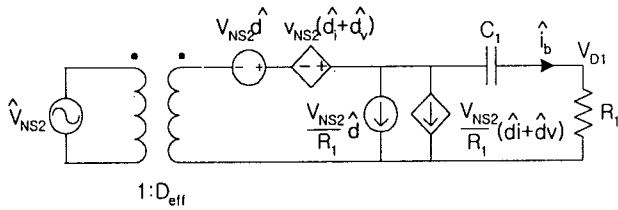


그림 3 PS FB-ZVS PWM 컨버터의 소신호 모델  
Fig. 3 Small-signal model of PS FB-ZVS PWM Converter

식(1)은 그림 3의 PS FB-ZVS PWM 컨버터 소신호 모델의 출력필터 전달함수이며, 식(2)는 출력 필터의 입력 임피던스를 나타낸다. 또한 식(3)은 HFHVT(T2)의 1차측 전압의 시비율에 따른 제어전달함수를 나타낸다.

$$H_o(s) = \frac{V_{D1}}{V_{NS2}} = \frac{sR_1C_1}{1 + sR_1C_1} \quad (1)$$

$$Z_f(s) = \frac{1 + sR_1C_1}{sC_1} \quad (2)$$

$$G_{vd}(s) = \frac{\hat{v}_{D1}}{\hat{d}} = H_o V_{NS2} \frac{Z_f}{Z_f + 2L_{lk}f_r} \quad (3)$$

여기서,  $L_{lk}$ 는 누설인덕턴스이며,  $f_r$ 은 스위칭 주파수이다. 식 (4)는 그림 2의 PS FB-ZVS PWM 컨버터의 소신호 모델에서 출력 전류의 미소 변동분을 나타낸 것이며, 식 (5)는 식 (4)에 따른 출력전류를 나타낸다.

$$\hat{d}_i = -\frac{\Delta t}{T_s} = -2 \frac{L_{lk}}{V_{NS2}} f_r \hat{i}_b \quad (4)$$

$$\hat{i}_b = V_{NS2} (\hat{d} + \hat{d}_i) \frac{1}{Z_f} \quad (5)$$

식 (4)와 (5)를 이용하여 HFHVT(T2) 1차측 전압의 시비율에 따른 양극전류의 제어 전달함수를 구하면 식 (6)과 같다.

$$G_{id}(s) = \frac{\hat{i}_b}{\hat{d}} = V_{NS2} \frac{1}{Z_f + 2L_{lk}f_r} \quad (6)$$

그림 4는 식 (6)을 이용하여 구한 주파수 영역에서의 출력전류  $G_{id}$ 의 응답특성으로 R-C 미분회로와 같은 특성을 보인다. 계산된 위상은  $90[^\circ]$ 이며, 적용한 파라미터는 표 1과 같다.

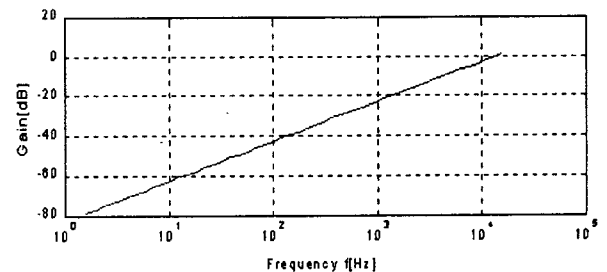


그림 4 PS FB-ZVS PWM 컨버터에서의  $G_{id}$ 의 주파수 응답  
Fig. 4 Frequency response of  $G_{id}(s)$  of PS FB-ZVS PWM Converter

표 1 PS FB-ZVS PWM 컨버터의 회로 파라미터  
Table 1 Parameters of PS FB-ZVS PWM Converter

요소	적용값	단위
$V_{NS2}$	2340	[V]
$R_1$	16	[k $\Omega$ ]
$C_1$	5	[nF]
$L_{lk}$	7.66	[ $\mu$ H]
$f_r$	20	[kHz]

### 3.2 평균 양극전류 제어기 설계

그림 2의 마그네트론 구동용 PS FB-ZVS PWM 컨버터 회로에서 마그네트론 출력은 양극전류  $I_b$ 를 제어하여 조절할 수 있다. 이 양극전류  $I_b$ 는 마그네트론에 Cut-off 전압 이상이 인가될 경우에만 흐르는 펄스형태의 전류이다. 본 논문에서는 마그네트론의 출력조절을 위하여 펄스형태의 양극전류의 평균값을 조절한다. 그림 5는 마그네트론 양극전류  $I_b$ 의 평균값을 제어하기 위한 제어기의 구성을 나타낸다.

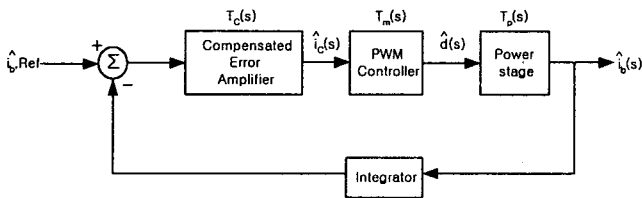


그림 5 평균 양극전류  $I_{b-avg}$  제어시스템  
Fig. 5 Control system of the average anode current  $I_{b-avg}$

제안된 PS FB-ZVS PWM 컨버터의 스위칭 주파수가 20[kHz]이므로 교차주파수를 약 1/5인 4[kHz]로 설정하여 그림 4에서 나타낸 PS FB-ZVS PWM 컨버터의 주파수 특성을 보상하는 제어기를 설계하였다. 그림 6은 설계된 전류 제어기의 주파수 특성을 나타낸다. 전류제어기의 위상은 전구간에 걸쳐  $-180[^\circ]$ 를 갖는다.

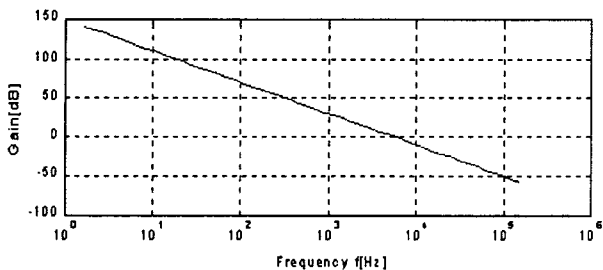


그림 6 제어기의 주파수 응답  $T_c(s)$   
Fig. 6 Frequency response of Controller  $T_c(s)$

그림 7은 설계된 제어기를 마그네트론 구동용 PS FB-ZVS PWM 컨버터에 적용했을 경우, 주파수 응답을 나타낸다. 교차주파수는 4[kHz] 부근에서  $-20[\text{dB}/\text{dec}]$ 의 기울기로 0[dB]를 지나는 것을 볼 수 있다.

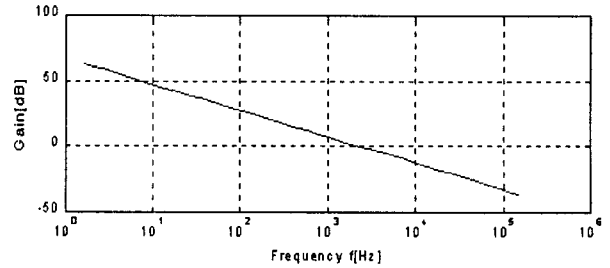


그림 7 PS FB-ZVS PWM 컨버터 폐루프 시스템 주파수 응답  
Fig. 7 Frequency response of Closed-loop PS FB-ZVS PWM Converter

표 2는 그림 2의 마그네트론 구동용 전원장치의 각종 전달함수와 설계된 평균 양극전류 제어기의 전달함수  $T_c(s)$  값을 나타낸다. 계산된 위상은  $-90[^\circ]$ 이다.

표 2 FB-ZVS PWM 컨버터 전달함수 및 평균 양극전류 제어기 전달함수

Table 2 Transfer functions of PS FB-ZVS PWM Converter and Controller for average anode current  $I_{b-avg}$

함수	값
$H_o(s)$	$\frac{8 \times 10^{-5}s}{8 \times 10^{-5}s + 1}$
$Z_f(s)$	$\frac{8 \times 10^{-5}s + 1}{5 \times 10^{-9}s}$
$G_{vd}(s)$	$\frac{7.488 \times 10^{-14}s^3 + 9.36 \times 10^{-10}s^2}{4.9024 \times 10^{-18}s^3 + 1.2256 \times 10^{-13}s^2 + 7.66 \times 10^{-10}s}$
$G_{id}(s)$	$\frac{1.17 \times 10^{-5}s}{1.2256 \times 10^{-13}s + 1}$
$T_c(s)$	$\frac{3.7552 \times 10^{-27}s^2 + 6.128 \times 10^{-14}s + 0.25}{1.3689 \times 10^{-10}s^2}$

## 4. 컴퓨터 시뮬레이션 결과

그림 2의 마그네트론 구동용 PS FB-ZVS PWM 컨버터와 설계된 제어기를 Simulink를 사용하여 컴퓨터 시뮬레이션을 실행하였다. 그림 8은 제안된 PS FB-ZVS PWM 컨버터를 ZVS가 보장되는 범위 내에서 평균 양극전류  $I_{b-avg}$ 가 1.5[mA]에서 시작하여 전체 시뮬레이션 구간 중 2.5[ms], 5[ms]에서 각각 2[mA], 1.5[mA]로 변화하도록 설정했을 때의 양극전류  $I_b$ 의 변화를 나타낸다. 시뮬레이션 구간 전체에 걸쳐 평균 전류값을 바꾸지

않은 부분에서는 양극전류  $I_b$ 가 일정하게 흐름을 알 수 있다.

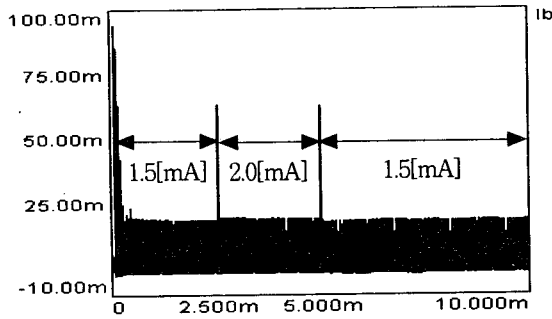


그림 8 양극전류  $I_b$

Fig. 8 Waveform of anode current  $I_b$

그림 9와 그림 10은 평균 양극전류  $I_{b-avg}$ 가 각각 1.5[mA], 2[mA]일 때의 HFHVT(T2) 2차측 고압다이오드  $D_1$  양단 전압  $V_{D1}$ 을 나타낸다. 관측된 Cut-off 전압은 약 4000[V]이다.

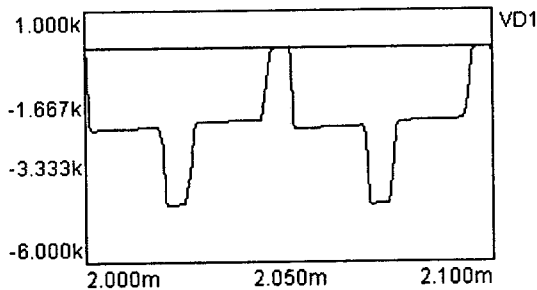


그림 9 평균 양극전류  $I_{b-avg}$ 가 1.5[mA]일때의  $V_{D1}$   
Fig. 9 Waveform of  $V_{D1}$  at the average value of  $I_{b-avg}$  1.5[mA]

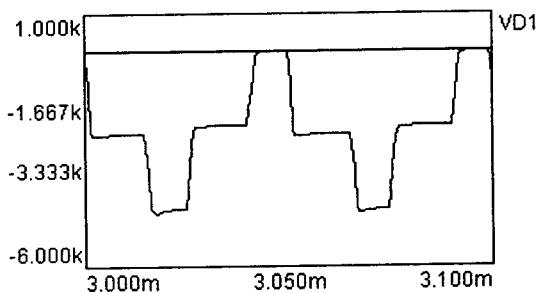


그림 10 평균 양극전류  $I_{b-avg}$ 가 2[mA]일때의  $V_{D1}$   
Fig. 10 Waveform of  $V_{D1}$  at the average value of  $I_{b-avg}$  2[mA]

그림 11과 그림 12는 평균 양극전류  $I_{b-avg}$ 가 각각 1.5[mA], 2[mA]일 때의 양극전류  $I_b$ 를 나타낸다. 측정된 양극전류 최대값은 평균 양극전류  $I_{b-avg}$ 가 1.5[mA]일 경우 18.48[mA]이고, 2[mA]일 때 19.46[mA]이다.

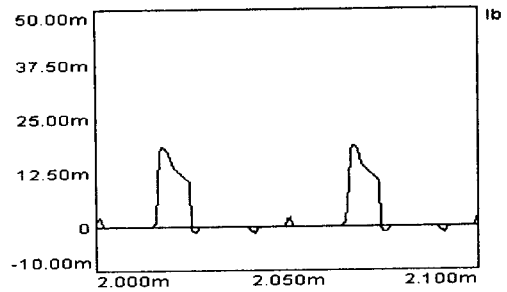


그림 11 평균 양극전류  $I_{b-avg}$ 가 1.5[mA]일때의  $I_b$   
Fig. 11 Waveform of  $I_b$  at the average value of  $I_{b-avg}$  1.5[mA]

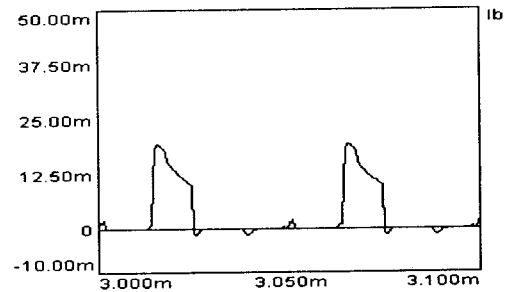


그림 12 평균 양극전류  $I_{b-avg}$ 가 2[mA]일때의  $I_b$   
Fig. 12 Waveform of  $I_b$  at the average value of  $I_{b-avg}$  2[mA]

## 5. 결 론

본 논문에서는 마그네트론 구동용 전원장치로 PS FB-ZVS PWM 컨버터의 사용을 제안하였으며, 이의 출력 조절을 위한 평균 양극전류 제어기를 설계하고 컴퓨터 시뮬레이션을 통해 적정성을 검증하였다.

마그네트론 양극 전류는 마그네트론 음극과 양극 사이에 Cut-off 전압 이상이 인가될 경우에만 흐르는 펄스형태의 전류이다. 평균 양극전류 제어기는 마그네트론의 출력조절을 위해 펄스 형태의 양극전류의 평균값을 제어한다.

## 참 고 문 헌

- [1] 이완운, 정교범, 신판석, "Phase-shifted FB-ZVS PWM 스위칭을 이용한 Microwave oven 구동회로 설계", *전력전자학회논문지*, 제6권 제3호, pp265~272, 2001. 6
- [2] J. Sabate, et, al., "Modeling and Design of Parallel-Module Power Supplies, part 1 : High-voltage DC-DC Converter Analysis", *Final report of Virginia power electronics center*, pp. 36~53, 1992.