

ZVS를 이용한 부하병렬 공진형 DC-DC 컨버터의 특성분석

황 계호, 남 승식, 오 경섭, 강 진욱, 김 동희, 노 채균
 영남대학교 전기공학과, 구미1대학 전기과

A Characteristic Analysis of the Parallel Resonant DC-DC Converter Using ZVS

Gye-Ho Hwang, Seung-Sik Nam, Kyeong-Seob Oh, Jin-Wook Kang, Dong-Hee Kim, Chae-Gyun Ro
 Dept. of Electrical Engineering Yeungnam University, Dept. of Electrical Engineering kumi College

Abstract - In this paper, proposal circuit proposes that load parallel resonant DC-DC Converter consist of L and C resonant tank circuit. Also, the capacitor(C₁, C₂) connected in switch are a common using by resonance capacitor and ZVS capacitor.

The analysis of proposed circuit uses normalized parameter and characteristic estimation which is needed in each step before design is generally described the proposed circuit with the characteristics of average power and average output voltage etc. Also, we conform a rightfulness theoretical analysis by comparing a theoretical values and experimental values obtained from experiment using MOSFET as switching devices.

1. 서 론

오늘날 반도체 소자의 발달로 구동전력이 적으며 스위칭 속도가 고속인 MOSFET, SIT, IGBT, Si-Thy등의 전력용 반도체 소자를 도입함에 따라 스위칭 주파수가 수십 kHz에서 수백 kHz이상의 고주파 스위칭 제어가 가능하게 되었다. 이런 소자들은 대전력 고속 스위칭 구동을 위해 스위칭 주파수를 고주파화 할 경우, 스위칭 소자의 온·오프에 따른 스위칭 소자의 전압과 전류스트레스가 증가하며, 회로의 표류 에너지를 처리하기 위한 실장기술이 문제점으로 발생되고, 또한, 스위칭에 의해서 발생하는 서지·노이즈 문제가 발생하여 문제점이 대두되고 있다. 이러한 문제점을 보완하기 위해 최근에는 공진특성을 이용한 ZVS(Zero Voltage Switching), ZCS(Zero Current Switching) 및 소프트 스위칭에 의해 이를 극복하여 고속 스위칭을 실현 가능하게 하며, 또 고주파 스위칭 기술은 전력변환장치의 소형·경량화, 고효율화, 저소음화, 제어 성능의 향상등의 장점을 갖는다.

따라서, 본 논문은 부하병렬 공진 DC-DC 컨버터의 공진부에 L를 삽입하여 LC 공진 탱크회로로 구성된 회로이며 2개의 스위칭 양단에 병렬로 삽입한 공진 커패시터는 공진요소와 ZVS 기능을 동시에 가지도록 한 부하병렬 공진형 DC-DC 컨버터를 연구 대상으로 하였다.

회로의 해석은 무차원화 파라미터를 도입하여 범용성 있게 기술하였고, 회로의 동작특성을 스위칭 주파수와 제 파라미터에 따라서 해석과 각각의 특성평가를 행하였다. 또, 특성평가를 가지고 실험전 범용시뮬레이션 툴인 Pspice를 사용하여 제안회로의 타당성을 검토하였다.

더욱이, Power-MOSFET를 연구대상회로의 스위칭 소자로 적용해 실험을 통해 이론해석의 정당성을 입증하고자 한다.

2. 부하병렬 공진형 DC-DC 컨버터

2.1 주회로 구성과 동작원리

그림 1은 부하병렬공진 DC-DC 컨버터의 공진부에 부

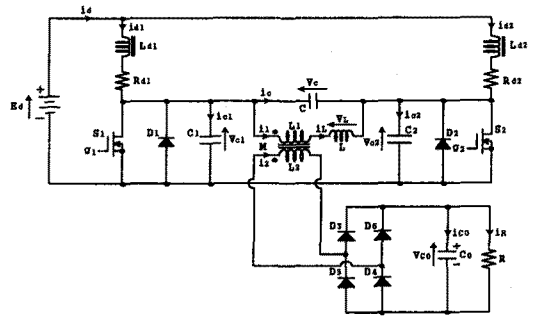


그림 1 ZVS를 이용한 부하병렬 공진형 DC-DC 컨버터

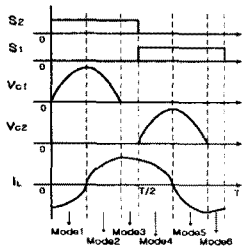
하와 병렬로 L을 삽입한 LC 공진탱크회로로 구성된 DC-DC 컨버터의 회로 구성을 보여주고 있다. 그림에서 보는 바와 같이, 회로구성이 간단하고, 전원측에 큰 리액터가 접속되어 부하단락사고시 단락전류의 상승률을 억제하여 회로보호가 용이하고, 부하변동에 대해 안정한 이점이 있다. 또, 스위치(S₁, S₂) 양단에 병렬로 공진 커패시터(C₁, C₂)를 삽입하여 공진 커패시터와 별도의 ZVS용 커패시터를 사용하지 않아도 스위칭시 소자에 발생되는 턴·온, 턴·오프 손실을 줄일 수 있고, 스위칭 전류부담을 줄일 수 있는 회로 구성임을 알 수 있다.

회로구성은 전원(E_g)으로부터 리플이 적은 정전류를 공급하기 위하여 리액터(L₄₁, L₄₂)가 공진 리액터(L)보다 큰 값으로 접속되어 있고, 스위칭 소자(S₁, S₂)는 자기소호 기능을 갖는 소자라면 어떤 것이나 사용 가능하며, 다이오드(D₁, D₂)는 회로운전 특성상 나타나는 무효전류를 흘려주기 위한 통로로 사용되고 있다. L, C, C₁, C₂는 공진 리액터 및 공진 커패시터이며, C₁, C₂는 스위칭 양단에 연결하여 스위칭시 발생하는 스위칭 손실을 최소화시킬 수 있는 Zero Voltage Switching의 역할을 하며, 고주파 변압기에 의해 1차와 2차를 절연, D₃~D₆는 정류용 다이오드로 역회복이 빠른 고속 다이오드가 사용된다.

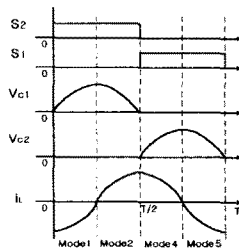
회로의 동작원리는 S₁이 온될 경우 공진전류는 정(+) , C₂는 충전된다. C₂의 충전이 끝나면, 공진전류가 부(-)로 되고, 이때 루프는 충전된 C₂ 전압이 S₁을 통해 방전되는 루프와 입력전원에 의해 공진탱크회로에 에너지가 공급되는 루프가 동시에 형성된다. C₂의 방전이 끝나면, 공진 리액터에 축적된 에너지에 의해 D₂를 통해 방전하는 루프와 입력전원에 의해서 S₁을 통해 부하로 에너지가 전달 되는 루프가 형성된다. 이 때 매 상태마다 공히 정류부의 다이오드는 변압기 2차측 전류 방향에 따라 (D₃, D₄), (D₅, D₆)으로 서로 온상태가 된다.

이상은 반주기에 관해서만 서술하였고 다음 반주기는 S₂가 턴·온 될 경우이며, 이것은 S₁이 턴·온 되는 경우와 같은 상태가 된다.

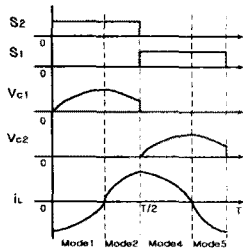
그림 2는 스위칭 소자(S₁, S₂)의 구동신호 스위칭 패턴과 이에 따른 V_{c1}, V_{c2}, i_L의 파형을 정성적으로 나타내고 있다. 여기서, 스위칭 소자(S₁, S₂)에 구동신호의 duty ratio는 항상 50%이며, 스위칭 주파수(f_{sw})와 공진주파수



패턴 I



패턴 II



패턴 III

그림 2 스위칭 패턴

(f_r)의 대소 관계에 의해 패턴 I, 패턴 II, 패턴 III로 나타내었다.

2.2 동작 모드와 회로 해석

제안회로의 해석을 위해서 구동신호패턴에 따라 스위칭 소자(S₁, S₂)와 다이오드(D₁, D₂)의 온·오프 동작과 (S₁, S₂)양단의 공진 커패시터(C₁, C₂)의 충·방전에 의해 한 주기에 12개의

의 모드가 형성되는데 변압기 2차측 다이오드를 공진전류의 방향에 따라 출력전압의 절대치를 취하면 6개의 동작모드로 분류되고, 또 각 패턴에 따른 동작모드 적용상태를 표 1에 나타내고 있다.

그림 3은 패턴에 따른 각 모드에 대한 동작모드를 나타내고 있다.

본 회로 해석을 위해 다음과 같은 가정을 설정한다.

- 1) 반도체 스위칭 소자 및 다이오드는 온시 임피던스가 영이고, 오프시 임피던스는 무한대인 이상적 스위칭 소자와 다이오드이다.
- 2) 전압원은 리플이 영인 직류전압 전원이다.
- 3) 변압기의 권수비는 1:1이다.
- 4) 배선의 손실과 커패시터와 리액터의 손실이 영인 이상적인 소자이다.
- 5) 부하는 저항부하이다.

이상의 가정에 따라 회로해석을 행하였고, 회로상태변수의 기호 및 기준방향은 그림 1과 같이 설정하였다. 그림 3의 동작모드에 따른 각 모드별 회로 상태 방정식을 회로 해석의 범용성 즉, 경량화를 부여하기 위해 표 2에서 나타낸 무차원화 파라미터를 도입하였다.

표 2를 이용한 각각의 모드별로 무차원화 상태방정식을 나타낼 수 있다. 그 모드중 모드 1의 무차원화 상태방정식은 다음의 식(1)과 같다.

표 1 패턴별 동작 모드

	공진부				정류부				패턴별 적용상태		
	S ₁	S ₂	D ₁	D ₂	D ₃	D ₄	D ₅	D ₆	I	II	III
MODE 1	OFF	OFF	OFF	ON	ON	ON	OFF	OFF	ON	ON	ON
MODE 2	OFF	ON	OFF	OFF	OFF	OFF	ON	ON	ON	ON	ON
MODE 3	OFF	ON	ON	OFF	OFF	OFF	ON	ON	ON	OFF	OFF
MODE 4	OFF	OFF	ON	OFF	OFF	OFF	ON	ON	ON	ON	ON
MODE 5	ON	OFF	OFF	OFF	ON	ON	OFF	OFF	ON	ON	ON
MODE 6	ON	OFF	OFF	ON	ON	ON	OFF	OFF	ON	OFF	OFF

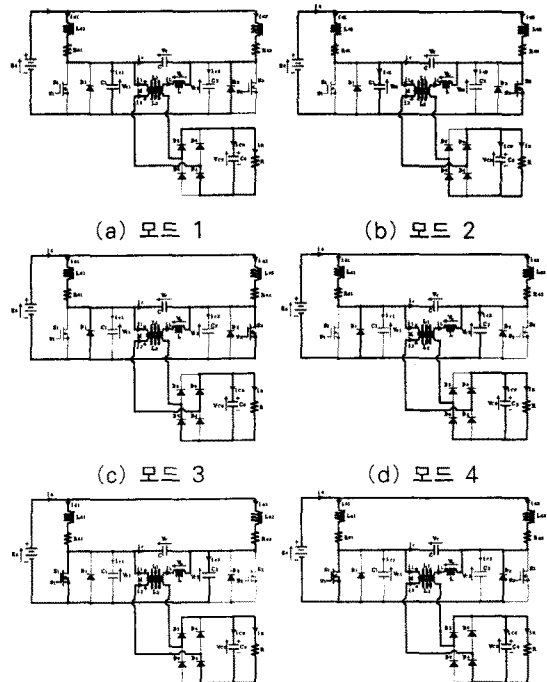


그림 3 동작모드

$$\frac{dX^*}{dz} = A^* \cdot X^* + B^* \cdot U^* \quad (1)$$

여기서 $X^* = [i_{a1}(z) \ i_{a2}(z) \ i_L(z) \ V_c(z) \ V_{c1}(z) \ V_{c2}(z)]^T$
 $U^* = [1 \ 1 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0]^T$ 이고, A*, B*는 아래와 같다.

$$A^* = 4\pi/\mu \begin{bmatrix} -\lambda_1/a_1 & 0 & 0 & -1/a_1 & 0 & 0 \\ 0 & -\lambda_1/a_1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \lambda_0 & -1 & -1 & 0 \\ 1/4(1+b) & 0 & -1/4(1+b) & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1/4b_0 & 0 & -1/4\lambda b_0 & 0 \\ 1/4(1+b) & 0 & -1/4(1+b) & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$B^* = \begin{bmatrix} -4\pi/\mu a_1 & 4\pi/\mu a_1 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}^T$$

각 모드에 존재하는 방정식이 교차로 되고, MOSFET의 온·오프 상태는 예측할 수는 있지만, D₁~D₆의 온·오프 상태는 예측하는 것이 불가능하므로 수치해석시 공진전류의 방향에 따라 모드를 판정하게 되며, 컴퓨터를 이용하여 수치해석을 행하였다. 표 2의 무차원화 파라미터 도입하여 범용성을 부여한 각 특성값을 이용하여 범용 시뮬레이션틀인 Pspice의 소자산정에 사용하였다.

3. 특성평가

그림 4는 λ=0.3, a₁=100, b₀=100, b=0.08인 경우, 패턴 I, 패턴 II, 패턴 III, 즉 μ=0.56, μ=0.76, μ=0.96으로 변화했을 때 V_c, V_{c1}, V_{c2}, i_L의 정상상태시 이론파형을 보여주고 있다. 그림 (a)의 패턴 I과 그림 (b)의 패턴 II인 경우 공진전류가 C₁과 C₂의 전압이 영인 상태에서 S₁과 S₂가 온·오프 됨을 알 수 있다. 따라서, 스위칭 양단에 병렬로 연결된 ZVS 기능을 가지는 공진 커패시터(C₁, C₂)의 양단 전압이 영인 상태에서 스위치가 턴·온, 턴·오프하므로 스위칭 손실이 없음을 알 수 있다. 또, 스위칭 양단에 발생하는 전압이 정현반파로 되므로 dv/dt를 경감시켜 주는 것도 알 수 있다. 그림 (c)의 패턴 III는 S₁, S₂가 온시 C₁과 C₂의 전압이 강제적으로 영

표 2 무차원화 파라미터

	Reference values	Normalized values
Voltage	$E_s = E_d$	$v' = v/E_s$
Current	$I_s = E_d/Z_s$	$i' = i/I_s$
Power	$P_s = E_s \times I_s$	$P' = p/P_s$
Impedence	$Z_s = 2\sqrt{L/C}$	$\lambda_1 = R_{d1}/Z_s = R_{d2}/Z_s$ $\lambda = R/Z_s, \lambda_0 = R_0/Z_s$
Inductance	$L_s = L$	$a_1 = L_{d1}/L_s = L_{d2}/L_s$
Capacitance	$C_s = C$	$b_0 = C_0/C_s$ $b_1 = C_1/C_s = C_2/C_s$
Frequency	$f_r = 1/2\pi\sqrt{LC}$	$\mu = f_{sw}/f_r$
Time	$T_s = 1/f_{sw}$	$z = t/T_s, d_t = d_s/T_s$

으로 방전됨을 알 수 있으며, 즉 스위치 온시 순간단락이 일어나서 스위치에 커패시터의 단락전류가 흘러 스위치의 스트레스를 발생한다.

그림 5는 패턴 I, 패턴 II, 패턴 III, 즉 $\mu=0.56$, $\mu=0.76$, $\mu=0.96$ 으로 변화했을 때 V_c, V_{c1}, V_{c2}, i_L 의 정상상태시 시물레이션틀인 Pspice파형을 보여주고 있다. 그림 5에 알 수 있듯이, 그림 4의 이론파형의 패턴별 유형이 거의 유사함을 알 수 있다. 이것은 특성평가의 특성값을 이용하여 실험전의 실험소자선정에 매우 유용함을 보여주고 있다.

본 연구대상회로인 DC-DC 컨버터를 Pspice로 시물레이션하여 제안한 회로의 타당성을 검토하고, 실험을 통하여 이를 증명하고 있다. Pspice와 실험에 사용된 회로정수는 표 3과 같다.

그림 6은 $a_1=100, b_0=100, b=0.08$ 인 경우, 부하 제어변수의 파라미터(λ)로 하여 주파수 제어변수(μ)에 대한 평균출력전력특성을 보여주고 있다. 즉, 부하 가변과 패턴 I에서 패턴III로 가변될 때의 평균출력전력특성을 보여주고 있다. 그림 6에서 알 수 있듯이 주파수 제어변수(μ)를 0.56에서부터 증가시키면 출력전력이 감소함을 보여주고 있다. 즉, 주파수를 증가시키면, 패턴 II를 지나면서 공진커패시터가 ZVS 기능을 하지 못하여 스위칭 양단에 공진 커패시터 전압이 인가된 상태에서 스위치가 동작하여 스위칭 손실을 발생시킨다. 또한, 부하 제어변수(λ)를 0.2에서부터 점점 증가시키면 역시 출력전력이 감소함을 알 수 있다.

그림 7은 $a_1=100, b_0=100, b=0.08$ 인 경우, 부하 제어변수의 파라미터(λ)로하여 주파수 제어변수(μ)에 대한 평균출력전압특성을 보여주고 있다. 즉, 부하 가변과 패턴 I에서 패턴III로 가변될 때의 평균출력전압특성을 보여주고 있다. 그림 7에서 알 수 있듯이 주파수 제어변수(μ)를 증가시키면 출력전압이 감소하고, 부하 제어변수(λ)를 증가시키면 출력전압은 점점 증가하는 특성을 알 수 있다.

그림 8은 이론해석의 정당성을 입증하기 위해서 실험을 통한 부하전류(i_L), 스위칭 양단전압(V_{c1}, V_{c2})의 실험파형을 보여주고 있다.

4. 결 론

본 논문은 부하변별 공진 DC-DC 컨버터의 공진부인 L을 삽입하여 LC 공진탱크회로로 구성된 회로이며 스위칭 양단에 병렬로 삽입한 공진커패시터는 공진요소와 ZVS 기능을 동시에 가지는 DC-DC 컨버터 회로를 연구대상회로로 하여 회로동작과 제특성을 이론적으로 검토하였다. 연구결과를 요약하면 대상회로는 패턴 I에서 패턴 II, 즉, $\mu \leq 0.76$ 에서는 ZVS 기능을 하지만 패턴 II에서 III, 즉, $\mu > 0.76$ 에서는 ZVS 기능을 하지 못함을 알 수 있었고, 또한 연구대상으로한 공진 DC-DC 컨버터의 회로해석을 행하여 설계된 단계에 필요한 특성평가를 무차원화 파라미터를 도입하여 범용성있게 기술하였고, 설계된 실험정수를 Pspice를 이용하여 시물레이션 파형과 이론 파형, Power-MOSFET를 사용한 실험파형

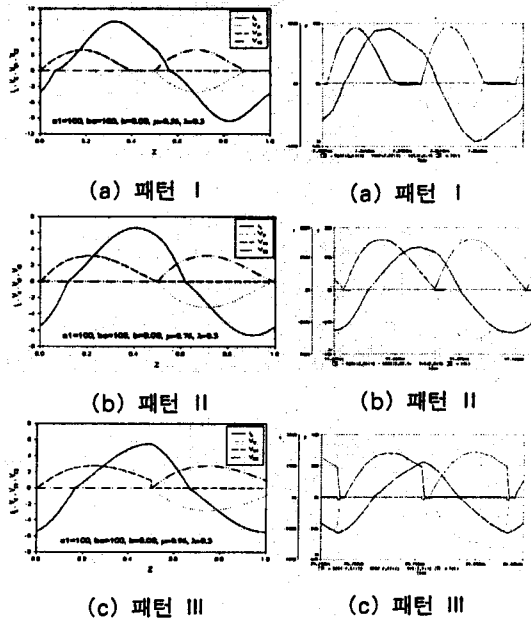


그림 4 이론파형

그림 5 시물레이션 파형

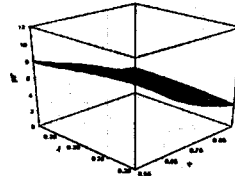


그림 6 출력전력특성

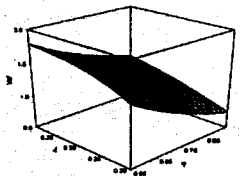
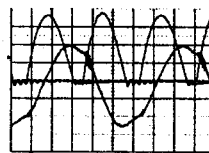
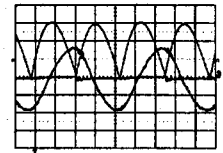


그림 7 출력전압특성



(a) 패턴 I
그림 8 실험파형



(b) 패턴 II

표 3 Pspice 소자정수와 실험 소자정수

circuit parameter	Pspice rating	Experimental Rating	circuit parameter	Pspice rating	Experimental Rating
E_d	100[V]	40[V]	C	0.148[μ F]	0.148[μ F]
S_1, S_2	IRFP240	SKM151F	R	6.6[Ω]	6.6[Ω]
L_{d1}, L_{d2}	2[mH]	1[mH]	L	18[μ H]	18[μ H]
C_1, C_2	12.1[nF]	12.1[nF]	f_r	97[kHz]	97[kHz]
C_0	1000[μ F]	2000[μ F]	f_{sw}	70[kHz]	72[kHz]

이 동일한경향을 나타내고 있음을 확인하였다. 향후, 본 회로는 소형 일전전압원장치로 응용될 수 있으리라 생각된다.

(참 고 문 헌)

[1] Guan-Cyun Hsieh, etc, "A study of series-resonant DC/AC Inverter", in Proceedings of the 1995 IEEE PSEC'95, Vol. 5, pp. 493-499, 1995
 [2] A. Takeuchi etc, "Zero-Voltage-Switching Controlled High Power-Factor Converter", in Proceedings of the 1995 IEEE PESC'96, Vol. 1, pp. 1859~1864, 1996