

액티브 공진 콘덴서를 이용한 소프트 스위칭형 PWM 전력변환기에 관한 연구

곽동걸

동해대학교 전기전자공학과

이현우

경남대학교 전기공학과

A study on PWM power conversion system by soft switching type using active resonant condenser

Dong-Ku Kwak*

Donghae university*

Hyun-Woo Lee

Kyungnam university

Abstract - The power conversion system must be increased switching frequency in order to achieve a small size, a light weight and a low noise. This paper proposes a skillful and a concise PWM DC-DC converter employing both zero voltage and zero current high frequency switching(ZVCS) operation. The proposal ZVCS circuit is composed with resonant circuit using active resonant condenser. And this circuit provides switches with ZVS and ZCS by quasi resonant only that switching transients appear. This operation results in reduction of stress and losses in the power devices and resonant components.

Some simulation results are included to confirm the validity of the analytical results.

1. 서 론

공진형 소프트 스위칭 기술은 저손실, 저잡음으로써 고주파 스위칭 동작이 가능하고, 보다 높은 변환주파수를 채용함에 따라 전버터를 포함한 전원장치의 소형·경량화를 초래하였으며 현재 실용화에 까지 이르렀다.^{[1][2]} 그러나 공진형은 스위칭 손실의 저감은 가능하나 속도적인 공진에 의하여 전류(轉流)손실이 증가하고 공진소자의 전압, 전류의 스트레스가 높은 단점이 있다. 이러한 결점을 보완하기 위하여 주 스위치가 동작 될 때만 공진회로부를 형성시켜 주 스위치를 보호하는 유사 공진형 소프트 스위칭 회로 메커니즘들이 연구되고 있다.^{[3][5]} 현 연구되고 있는 유사 공진의 기법들에 있어 공진을 으로 사용되는 콘덴서에는 상시 전원전압의 최대치 이상으로 충전되거나 방전되는 공진형태를 가지게 되어 공진손실을 초래하며 그 결과 전력변환기의 전체 손실을 감소시키고 공진 소자들의 스트레스를 가져오는 결점을 포함하고 있다. 본 논문에서는 이러한 결점을 보완하기 위하여 전력변환 회로 내에 유사 공진 회로를 설계하여 영전압 스위칭(zero voltage switching, ZVS), 영전류 스위칭(zero current switching, ZCS)에 의한 스위칭 손실을 저감시키며 또한 사용된 공진용 소자들에는 원하는 전압, 전류만을 충방전시키는 새로운 회로 메커니즘을 제안하여 공진손실을 극소화시키는 전력변환기를 제안하고 해석하며, 회로 시뮬레이션을 통해 이를 입증하고자 한다. 또한 향후 본 전력변환기가 DC-AC 인버터에 용융될 경우 기존의 공진형 인버터^[1]에서 나타나는 불규칙적인 공진 피크전압의 악영향을 제거할 수 있으리라 고려된다.

2. 회로구성과 제어원리

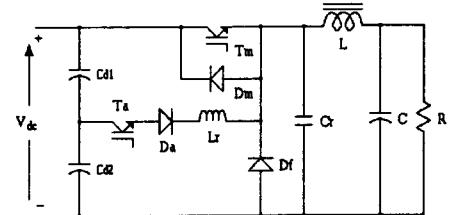


Fig.1 PWM converter by soft switching type

그림 1에 회로 토플로지를 나타낸다. 본 회로는 종전의 하드 스위칭 강압형 DC-DC 컨버터에 유사 공진회로를 추가한 것이라 할 수 있다. 그림 1에 있어서 T_m 은 주 스위치(이하, S_m)이며 T_a 는 유사공진용 보조 스위치(이하, S_a)로써 S_m 을 소프트 스위칭으로 시키기 위한 것이다. S_a 는 온-오프 동작시 다같이 ZCS/ZVS의 복합모드로써 동작하여 온-오프시 스위치의 손실을 최소로 한다. 평활용 인덕턴스가 공진용 인덕턴스 보다 충분히 큰것으로 가정하면 출력전류를 정전류원 I_o 로 보는 것이 가능하다. 초기조건으로 스위치 S_a 가 터-온하기 전에 다이오드 D_f 에 출력전류 I_o 가 흘러 콘덴서전압 v_{cr} 이 제로로 클램프되어 있으며 스위칭 주기의 시점 $t=T_0$ 에서 S_a 가 도통한다. 여기서 보조 스위치 S_a 의 동작은 ZCS의 조건이 성립된다. 그림 2는 그림 1의 각 정상동작 모드에 대한 스위칭 한 주기에 대한 7모드에 대해 나타낸다. 동작원리를 각 모드별로 살펴보면 다음과 같다.

(1) 선형 구간 [$T_0 \leq t \leq T_1$; 모드 a]

스위치 S_a 가 온하면 공진인덕터 전류 i_a 가 직선적으로 증가하고 공진콘덴서 전압 v_{cr} 이 전원전압으로 되돌아오기 위해서 필요한 에너지가 인덕터에 축적된다. 환류다이오드 D_f 에는 $I_o - i_a$ 의 전류가 흐른다. 이때의 상태방정식은 다음 식으로 된다.

$$V_{Df} = 0 \quad \dots \dots \dots \quad (1)$$

$$L_r \left(\frac{di_a}{dt} \right) = V_{cd2} \quad \dots \dots \dots \quad (2)$$

이 구간의 기간 $T_{d1} (=T_1 - T_0)$ 은 경계조건 $i_a(0)=0$, $i_a(T_{d1})=I_o$ 라고 하면

$$T_{d1} = L_r \left(I_o / V_{cd2} \right) \quad \dots \dots \dots \quad (3)$$

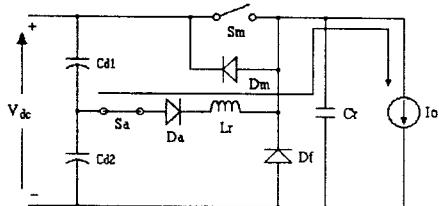


Fig. 2(a) Mode a

(2) 공진 1구간 [$T_1 \leq t \leq T_2$; 모드 b]

T_1 에서 인터터 전류는 I_o 이고 D_f 는 비도통 상태이며 $i_a(t) - I_o$ 인 전류가 콘덴서를 v_{cr} 로 충전시킨다. 이 구간의 상태방정식은 다음 식으로 주어진다.

$$C_r(dv_{cr}/dt) = i_a(t) - I_o \quad \dots \dots \dots (4)$$

$$L_r(di_a/dt) = V_{cd2} - v_{cr}(t) \quad \dots \dots \dots (5)$$

초기조건 $i_a(T_1) = I_o$, $v_{cr}(T_1) = 0$ 이므로

$$i_a(t) = I_o + (V_{cd2}/Z_r) \sin \omega t \quad \dots \dots \dots (6)$$

$$v_{cr}(t) = V_{cd2}(1 - \cos \omega t) \quad \dots \dots \dots (7)$$

로 된다. 단, $Z_r = \sqrt{L_r/C_r}$, $\omega = 1/\sqrt{C_r L_r}$ 이다.

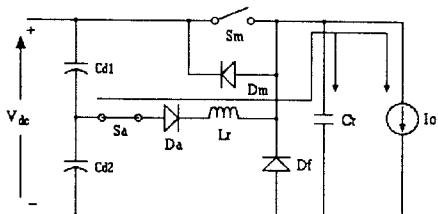


Fig. 2(b) Mode b

(3) 공진 2구간 [$T_2 \leq t \leq T_5$; 모드 c ~ 모드 e]

모드 c에서는 주 스위치 S_m 의 역도통 다이오드 D_m 이 도통하여 전원측으로 전류가 유입되어 에너지를 되돌린다. 이 때에 S_m 을 터-온시켜 모드 d로 된다. 전류 i_{sm} 은

$$i_{sm} = i_a(t) - I_o \quad \dots \dots \dots (8)$$

로 된다. 여기서 S_m 의 동작은 ZVS의 조건을 만족한다. 시각 T_4 에서 주 스위치에 흐르는 전류가 부하전류로 되어 에너지가 공급된다. 모드 e의 구간에서 보조 스위치 S_a 를 오프하여 ZCS의 조건을 만족시킨다.

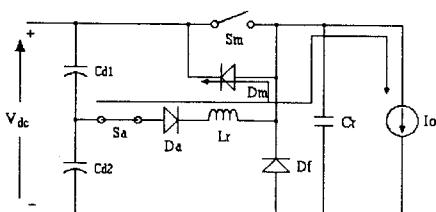


Fig. 2(c) Mode c

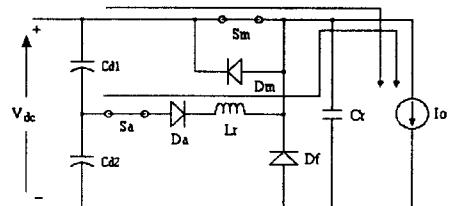


Fig. 2(d) Mode d

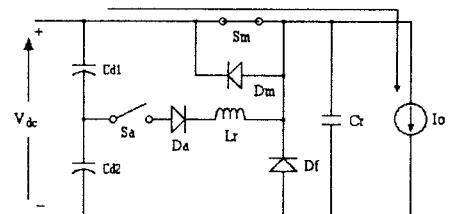


Fig. 2(e) Mode e

(4) 회복 구간 [$T_5 \leq t \leq T_6$; 모드 f]

시각 T_5 에서 주 스위치 S_m 을 오프시키면 콘덴서 C_r 의 충전 전하는 출력 루프를 통하여 방전되어 직선적으로 제로로 수렴된다. 이 때의 S_m 은 ZVS의 스위칭 동작이 된다. 이 구간에서의 상태방정식은 다음과 같다.

$$C_r(dv_{cr}/dt) = I_o \quad \dots \dots \dots (9)$$

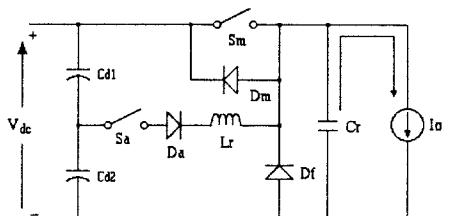


Fig. 2(f) Mode f

(5) 환류 구간 [$T_6 \leq t \leq T_7$; 모드 g]

이 구간은 출력전류가 환류 다이오드 D_f 를 통하여 흐르는 구간으로 다음 스위칭의 대기상태라 할 수 있다.

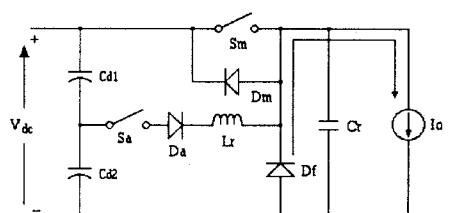


Fig. 2(g) Mode g

Fig. 2 Equivalent circuits of operating modes in one cycle switching

3. 제안회로의 시뮬레이션 결과

제안한 소프트 스위칭형 PWM 컨버터의 스위치 S_m , S_a 의 신호 시퀀서에 대한 각 부동작 시뮬레이션 과정을 그림 3에 나타낸다. 제어스위치는 가변저항 스위치로 가정하고, 그의 소자는 이상적인 소자로 하여 PSpice에 의한 시뮬레이션을 실행한 결과이다.

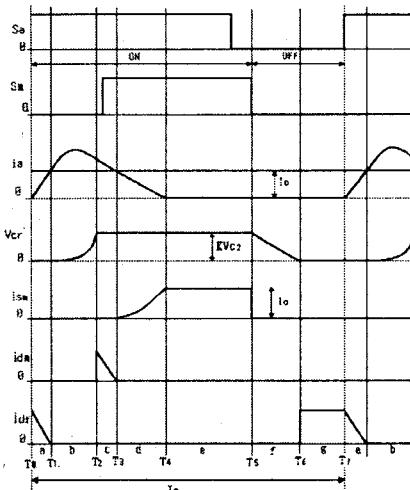
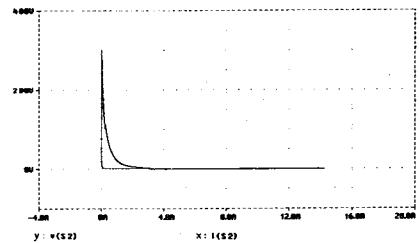


Fig. 3 Simulation waveforms with switching operation

제안된 소프트 스위칭 컨버터와 유사 공진기법이 적용되지 않은 기존의 하드 스위칭 PWM DC-DC 컨버터의 스위칭 손실을 비교하기 위해서 제어소자의 V-I 특성곡선을 그림 4에 나타낸다. V-I 특성곡선에서 둘러싸인 면적이 스위칭 손실과 비례되므로 제안된 방식의 스위칭 손실이 매우 적음을 알 수 있다.



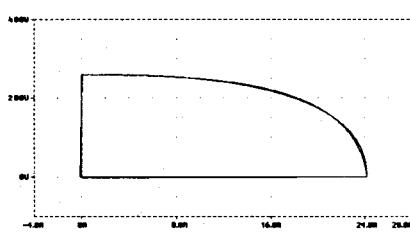
(c) 소프트 스위칭에서의 스위칭 궤적(스위치 S_a)

Fig. 4 Switching locus of control device

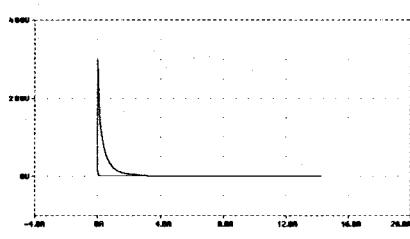
4. 결 론

간단한 회로구성과 참신한 제어기법에 의한 소프트 스위칭형 PWM 전력변환기를 제시하여 해석하였다.

제안된 회로는 고주파 동작시에 있어서도 스위치 손실과 전압전류의 다이나믹 스트레스를 최소화 할 수 있으며 스위치 S_m , S_a 다같이 직류전원 전압에 액티브 되므로 소자의 내압 정격한계 부근에서의 설계가 가능하다. 그리고 유사 공진 소프트 스위칭 기법에 의해 사용된 스위치들은 소프트 스위칭에 의해 스위칭 손실이 저감되며, 공진 회로부는 유사 공진 및 공진용 콘덴서의 액티브 동작으로 인하여 공진손실 및 공진용 소자들의 스트레스가 감소되므로 변환기는 고효율로 동작되며 회로구조가 간단하다. 그리고 회로내에 사용된 제어소자들은 적정배치로 인해 용량분담이 줄고, 제어기법도 간단하다. 회로 시뮬레이션을 통해 이를 입증하였으며, 또한 향후 본 전력변환기가 DC-AC 인버터에 응용될 경우 기존의 공진형 인버터에서 나타나는 불규칙적인 공진 피크전압의 악영향을 제거할 수 있으리라 고려된다.



(a) 하드 스위칭에서의 스위칭 궤적



(b) 소프트 스위칭에서의 스위칭 궤적(스위치 S_m)

[참 고 문 헌]

- [1] D.M.Divan, "The Resonant DC Link Converter - A New Concept in Power Conversion", IEEE IAS Rec., pp. 648-656, 1986
- [2] G.Venkataraman, D.M.Divan, "Pulse Width Modulation with Resonant DC Link Converters", IEEE IAS, pp. 984-990, 1990
- [3] L.D.Salazar, G.Joos, P.D.Ziegas, "A low loss soft switching PWM CSI", IEEE PESC Proceeding, pp. 1098-1140, 1992
- [4] D.K.Kwak, K.Y.Suh, S.K.Kwon, H.W.Lee, "Novel soft-switching DC-DC converter of high efficiency", International Conference on Power Electronics, '95 Proceeding, pp. 730-735, 1995
- [5] K.Taniuchi, K.Nishiyama and N.Kimura, "A soft switching converter with high power factor using loss less snubber", Trans.IEE in Japan, Vol.115-D, No.1, pp. 84-85, 1995