

## 소프트 스위칭 전류원 인버터를 이용한 계통연계형 전력변환기

최영도\*, 이준기\*, 백승택\*, 한병문\*, 소용철\*\*

\*명지대학교, \*\*경기공업대

### Soft-switching Current Source Inverter for Power System Interconnection

\*Young-Do Choy, \*Joon-Gee Lee, \*Seung-Taek Baek, \*Byung-Moon Han, \*\*Yong-Chul So  
\*Myongji University, \*\*Kyonggi Institute of Technology

#### ABSTRACT

This paper proposes a soft-switching current-source inverter with a switched-capacitor module. The system operation was analyzed by a theoretical approach with equivalent circuits and verified by a computer simulation with ISPIICE software. The proposed system could be effectively applied for the power converter of photovoltaic power generation interconnected with the power system.

#### 1. 서 론

현재 선진 각국에서는 기존에 사용되고 있는 화력발전이나 원자력 발전을 통한 전기에너지 개발보다는 새로운 대체 에너지 개발을 추진하고 있다.

대체 에너지 중에서도 공해가 없으며 공급의 안정도 및 건설장소의 어려움이 가장 좋은 태양에너지를 이용하는 태양광 발전 시스템이 각광받고 있는 실정이다. 태양광을 이용하는 태양전지의 출력 특성은 직류이므로 계통과 연계하기 위해서는 인버터를 사용해서 직류를 교류로 변환하는 전력변환기가 필수적이다.

태양광 발전 시스템에 사용되는 인버터는 전압형보다는 전류형 인버터가 더 효율적이다. 최근 전류원인버터에 소프트스위칭회로를 부착하여 스위칭손실을 절감하는 연구가 몇몇 연구자에 의해 수행된 적이 있다<sup>[1,2]</sup>. 본 논문은 이점에 착안하여 소프트스위칭회로를 부착하여 소자의 스위칭시 발생하는 손실을 줄이고 소자의 스트레스를 경감시키는 전류원 PWM 인버터를 제안한다. 제안하는 계통연계형 전류원 인버터는 인버터의 스위칭손실이 낮아 전류원 방식의 리액터 손실이 큰 단점을 보완 가능 할 것으로 보이며 전압원 방식과 효율면에서 경쟁력이

있을 것으로 기대된다. 본 논문에서는 톱니파 비교 방식의 PWM을 사용하는 소프트 스위칭 전류원 인버터를 제안하고 그 동작을 SPICE 시뮬레이션을 통해 검증한 내용을 기술하고 있다.<sup>[3]</sup>

#### 2. 소프트스위칭 전류원 인버터

소프트 스위칭 전류원 인버터는 그림 1에 나타낸 바와 같이 입력전원을 전류원으로 동작시키기 위한 직류 리액터  $L_s$ 와 소프트 스위칭을 하기 위한 커뮤테이션 회로, 그리고 풀브릿지 인버터로 구성된 구조를 가지고 있다. 인버터는 풀브릿지 형태의 스위치( $S_1 \sim S_4$ )로 구성되어 있고 각각의 스위치에는 역전류를 방지하기 위해서 직렬로 다이오드가 부착되어 있다. 커뮤테이션 회로에는 공진 리액터  $L_r$ 과 공진 캐패시터  $C_r$ , 그리고 스위치  $S_{11}$ ,  $S_{12}$ 와 다이오드  $D_{11}$ ,  $D_{12}$ 로 구성되어 있다.

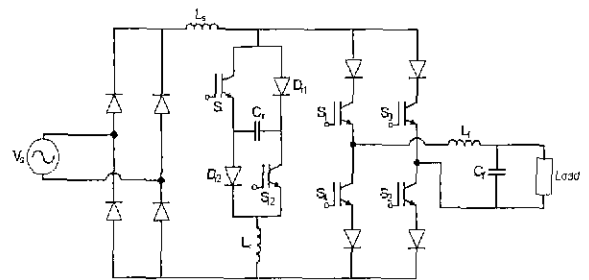


그림 1 소프트 스위칭 전류원 인버터

Fig. 1 Soft-switching current source inverter

그림 2는 스위치 타이밍 순서도와 공진 인덕터 전류( $I_{Lr}$ ), 공진 캐패시터 전압( $V_{Cr}$ )의 동작파형을 나타낸 것이고 그림 3은 소프트스위칭 무효전력보상의 동작을 모드별로 나타낸 것이다.

#### ■ Mode 0 - 초기상태

초기상태에서 전류는 인버터 회로의 스위치  $S_1$ 과

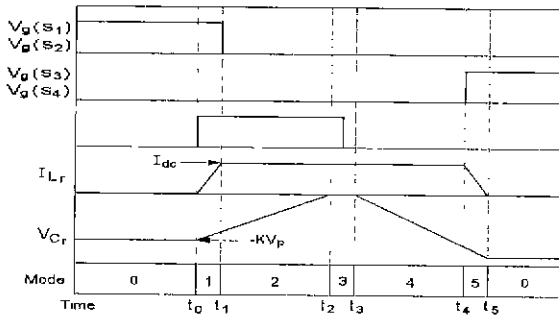


그림 2 커뮤테이션 동작파형

Fig. 2 Operating waveforms of the commutation circuit

$S_2$ 을 통해서 흐르고 공진 캐패시터  $C_r$ 은  $-KV_p$ 로 충전되어있다.  $V_p$ 는 전원에서의 순간 피크전압이다.

■ Mode 1 - 전류 이동 모드( $t_0 < t < t_1$ )

커뮤테이션 회로스위치  $S_{r1}$ 과  $S_{r2}$ 가 영전류상태에서 턴온되고 전류  $I_{Lr}$ 는 점차 증가하여  $I_{dc}$ 까지 증가되며, 이때 인버터 회로스위치  $S_2$ 는 영전류상태가 되고 그 순간  $S_2$ 를 턴오프시킨다.

초기조건 :  $i_{Lr} = 0$ ,  $V_{cr} = -K V_p$

$$i_{Lr} = -\frac{1}{Z_x} (K V_p + V_s) \sin \omega(t - t_0)$$

$$V_{cr} = V_s - (K V_p + V_s) \cos \omega(t - t_0)$$

여기서,  $Z_x = \sqrt{\frac{L_r}{C_r}}$ ,  $\omega = \frac{1}{\sqrt{L_r C_r}}$

그러므로 Mode 1의 기간은,

$$t_1 - t_0 = \frac{1}{\omega} \sin^{-1} \left( \frac{Z_x I_{dc}}{K V_p + V_s} \right)$$

$t = t_0$ 에서의 캐패시터 전압은,

$$V_{cr1} = V_s - \sqrt{(K V_p + V_s)^2 - (Z_x I_{dc})^2}$$

■ Mode 2 - 공진캐패시터 방전 모드( $t_1 < t < t_2$ )

이 모드에서는  $I_{dc}$ 는 에너지저장 리액터와 커뮤테이션 회로의  $S_{r1}$ ,  $C_r$ ,  $S_{r2}$ 로 흐르게 되며  $C_r$ 이 방전될때까지 이루어진다.

$$i_{Lr} = I_{dc}, \quad V_{cr} = \frac{I_{dc}}{C_r} (t - t_1) + V_{cr1}$$

Mode 2에서의 기간은,

$$t_2 - t_1 = \frac{-C_r V_{cr1}}{I_{dc}}$$

$$= -\frac{C_r}{I_{dc}} \left( V_s - \sqrt{(K V_p + V_s)^2 - (Z_x I_{dc})^2} \right)$$

인버터스위치에 역전압이 걸리는 시간은,

$$T_{rbs} = \frac{C_r}{I_{dc}} (V_0 - V_{cr1})$$

$$= -\frac{C_r}{I_{dc}} \sqrt{(K V_p + V_s)^2 - (Z_x I_{dc})^2}$$

■ Mode 3 - 프리윙링 모드( $t_2 < t < t_3$ )

전류는  $S_{r1}$ ,  $D_{r1}$ 과  $S_{r2}$ ,  $D_{r2}$ 를 통해 흐르며 공진 캐패시터의 전압은 0이 된다.

$$i_{Lr} = I_{dc}, \quad V_{cr} = 0$$

Mode 3의 기간은,

$$t_3 - t_2 = 0$$

■ Mode 4 - 공진 캐패시터 충전 모드( $t_3 < t < t_4$ )

커뮤테이션 회로의 스위치  $S_{r1}$ 과  $S_{r2}$ 는 ZVS상태에서 턴오프되고 전류는  $D_{r1}$ ,  $C_r$ ,  $D_{r2}$ 로 흐르게 되며 그 결과  $C_r$ 이 충전된다.

$$i_{Lr} = I_{dc}, \quad V_{cr} = -\frac{I_{dc}}{C_r} (t - t_3)$$

Mode 4의 기간은,

$$t_4 - t_3 = \frac{C_r K V_p}{I_{dc}}$$

■ Mode 5 - 전류 이동 모드( $t_4 < t < t_5$ )

공진캐패시터가  $-KV_p$ 로 충전되었을 때 인버터 회로스위치  $S_3$ 과  $S_4$ 는 ZCS상태에서 턴온하게 된다. 이후에는 커뮤테이션회로는 차단되며 전류원인 버터만이 동작하게 된다.

초기조건 :  $i_{Lr} = -I_{dc}$ ,  $V_{cr} = -KV_p$

$$i_{Lr} = -\frac{1}{Z_x} (K V_p - V_s) \sin \omega(t - t_4)$$

$$+ I_{dc} \cos \omega(t - t_4)$$

$$V_{cr} = V_s' + (K V_p - V_s) \cos \omega(t - t_4)$$

$$+ Z_x I_{dc} \sin \omega(t - t_4)$$

Mode 5의 기간은,

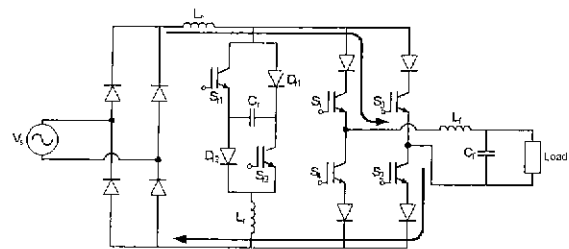
$$t_5 - t_4 = \frac{1}{\omega} \tan^{-1} \left( \frac{Z_x I_{dc}}{K V_p - V_s'} \right)$$

전체 커뮤테이션 시간은,

$$t_5 - t_4 = \frac{1}{\omega} \sin^{-1} \left( \frac{Z_x I_{dc}}{K V_p + V_s} \right)$$

$$- \frac{1}{\omega} \tan^{-1} \left( \frac{Z_x I_{dc}}{K V_p + V_s} \right) + \frac{C_r K V_p}{I_{dc}}$$

$$- \frac{C_r}{I_{dc}} \left( V_s - \sqrt{(K V_p + V_s)^2 - (Z_x I_{dc})^2} \right)$$



(a) Mode 0

### 3. 스위칭 패턴

반도체 스위칭 소자의 온, 오프를 제어하는 스위칭 패턴은 인버터 출력전압의 고조파를 결정할 뿐만 아니라 직류리액터에 흐르는 전류의 고조파 성분에도 직접적인 영향을 미친다. 일반적으로 스위칭 주파수가 높으면 고조파 성분을 줄일 수 있다. 교류반주기 동안 하나의 스위칭 소자에 공급되는 PWM의 펄스의 수는 소자의 스위칭 속도 뿐만 아니라 커뮤테이션 회로의 공진주파수에 따라 임의로 결정된다.

출력전류를 형성하는 정현파를 만들기 위해서 전류원 인버터 PWM은 신호파로서 기준파와 스위칭 소자  $S_1 \sim S_4$ 를 스위칭하는 PWM 패턴을 결정하기 위한 캐리어 신호로서 고주파수 톱니파형을 비교한다. 톱니파 PWM 제어기법이 그림 5(a)에 나타나 있다.  $S_1$ 과  $S_3$ 에 공급되는 펄스는 반주기 온 상태를 유지시키도록 구형파 제어를 하고  $S_4$ 에 공급되는 펄스는 정현파를 전파시킨 기준파와 톱니파를 비교하는 제어를 수행하는데 여기서 반주기 동안은 기준파가 톱니파보다 클 때 펄스가 생성이 되고 나머지 반주기 동안은 톱니파가 기준파보다 클 때 펄스가 생성이 되도록 제어한다.

그림 4는 톱니파 PWM 방식의 제어도를 나타낸 것이다.

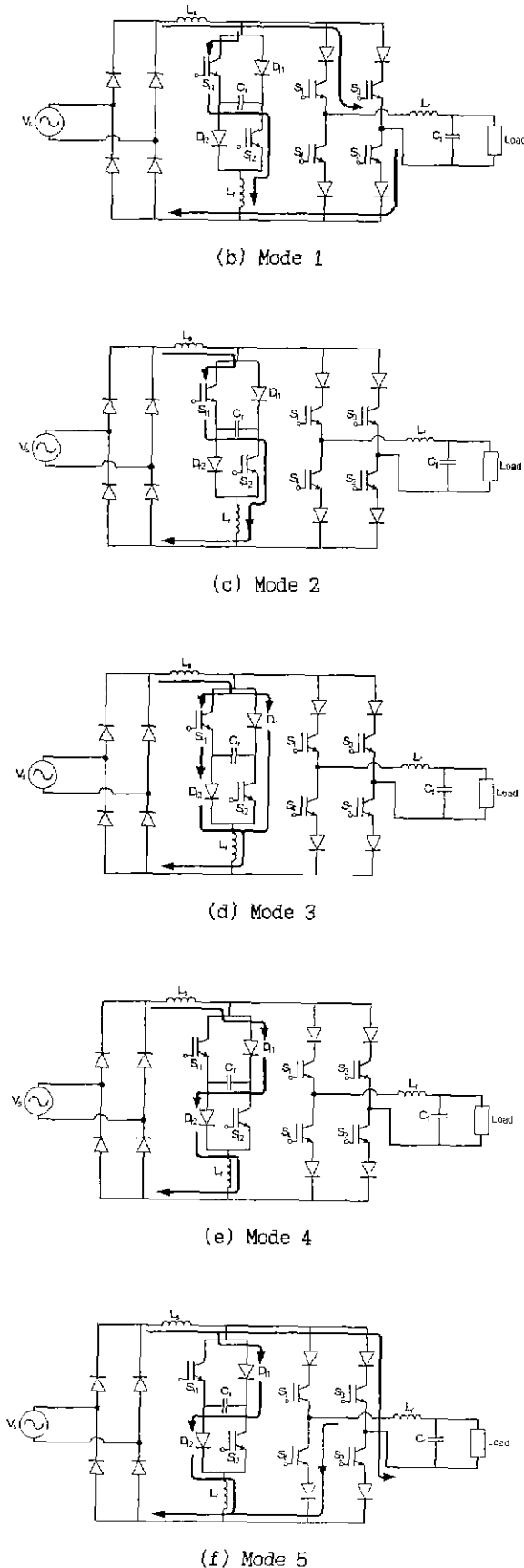


그림 3 커뮤테이션 동작모드  
Fig. 3 Operation mode of commutation

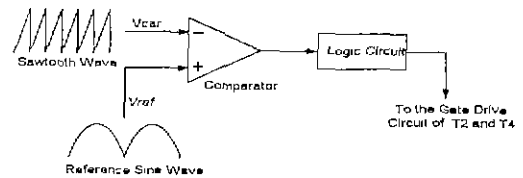


그림 4 제어회로도  
Fig. 4 Control circuit

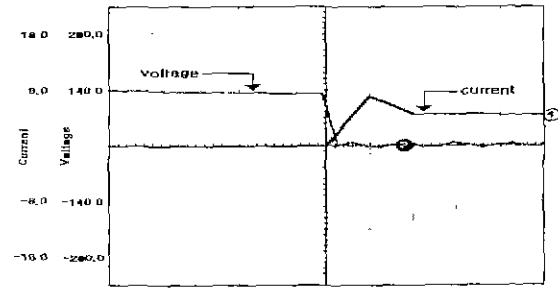
### 4. 시뮬레이션

톱니파 PWM 제어기법을 적용한 소프트스위칭 전류원인버터의 동작을 검증하기 위해 Is-Spice에 의한 시뮬레이션을 실시하였다. 시뮬레이션모형의 전력회로는 그림 1에 보인 것과 동일하게 구성하였다. 시뮬레이션에서 사용된 파라미터는 표 1과 같다.

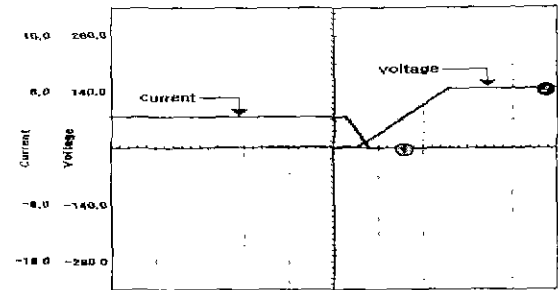
표 1 시뮬레이션 파라미터  
Table 1 Parameters of simulations

전원전압	110 V
필터 ( $L_f, C_f$ )	6 mH, 50 $\mu$ F
공진리액터 ( $L_r$ )	10 $\mu$ H
공진캐패시터 ( $C_r$ )	0.05 $\mu$ H
직류리액터 ( $L_s$ )	300 mH

그림 5는 시뮬레이션 결과를 나타낸 것이다. 그림 5(a)는 게이트 펄스를 생성하기 위한 기준파와 캐리어 파형을 나타낸 것이다. 반주기동안은 기준파가 캐리어보다 클 때 펄스가 생성이 되고 나머지 반주기동안은 캐리어파가 기준파보다 클 때 펄스가 생성이 되서 스위치에 게이트 펄스로 공급된다. 그림 5(b)는소프트 스위칭 전류원 인버터의 출력 전압과 전류 파형을 나타낸 것이다. 그림 5(c)는 그림 5(a)의 기준파와 캐리어파에 의해서 생성된 PWM 펄스와 공진 스위치에 공급되는 게이트 펄스를 나타낸 것이다. 스위치 S1과 S3에 공급되는 게이트 펄스는 반주기동안 온 상태를 유지하도록 구형파 제어를 수행한다. 그림 5(d)는 인버터 스위치 턴온시의 전압, 전류 파형을 나타낸 것이다. 영전류 상태에서 턴온이 되는 것을 볼 수가 있다. 그림 5(e)는 인버터 스위치 턴오프시의 전압, 전류 파형을 나타낸 것이다. 영전압 상태에서 턴오프가 되는 것을 볼 수가 있다.



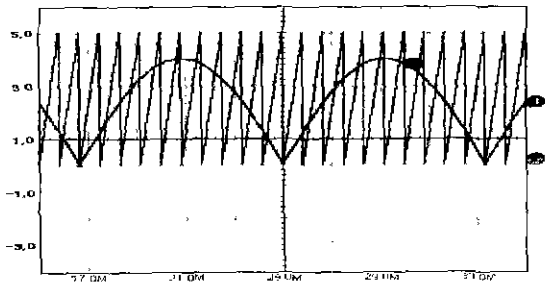
(d) 스위치 온시 전압, 전류



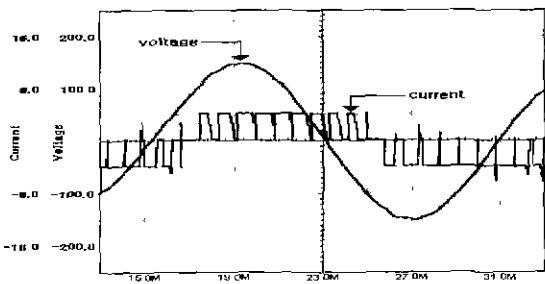
(e) 스위치 오프시 전압, 전류

그림 5 시뮬레이션 결과

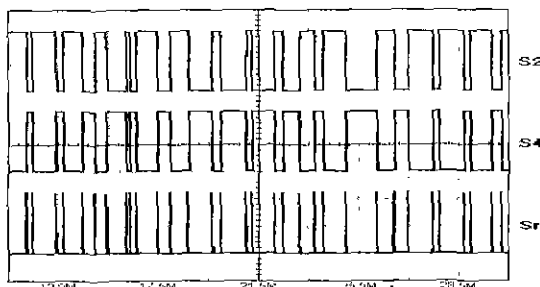
Fig. 5 Simulation results



(a) 생성 PWM 펄스



(b) 인버터출력 전압 전류



(c) 게이트 펄스

## 5. 결 론

본 논문에서는 캐패시터 스위치방식 소프트스위칭 전류원인버터를 제안하고 그 특성을 이론적인 접근과 ISPIICE 소프트웨어를 이용한 시뮬레이션으로 분석하였다. 제안하는 시스템은 기존의 하드스위칭 전력변환기에 비해 스위칭손실이 적어 전력계통과 연계된 태양광발전에 효과적으로 활용 가능할 것으로 보인다.

## 참고문헌

- [1] Y.Konoshi, E.Hiraki, Y.Matsumoto, Y.L.Feng and M.Nakaoka, "Current-Fed Three-Phase Converter and Voltage-Fed Three-Phase Converter using Optimum PWM Pattern and Their Performance Evaluation", Conf. Rec. of IEEE EPE-Annual Meeting, pp. 2893-2900, 1997
- [2] Gerry Moschopoulos and Geza Joos, "A Novel Soft-Switched PWM Current Source Rectifier/Inverter", Conf. Rec. of IEEE PESC-Annual Meeting, pp. 573-579, 1997
- [3] K.Hirachi, K.Maysumoto, "Harmonic Current Reduction Control Scheme Single-phase Current-Source-Fed PWM Inverter and Its PV System Application", Proc. PEMC'98, No.7, pp.59-64, 1998