

히스테리시스 제어기법을 이용한 태양광발전용 인버터 출력특성에 관한 연구

임홍우\*, 최연옥\*, 김기범\*, 백형래\*, 조금배\*, 김동휘\*\*  
 \*조선대학교, \*\*여수공업대학

A Study on the Characteristics of Solar Cell Inverter Using Hysteresis control Technique

Hongwoo Lim\*, Younok Choi\*, Hyunglae baek\*, Geumbae cho\*, Donghwi kim\*\*  
 \*Chosun University, \*\*Yosu technical college

**Abstract** - In this paper, a simple, novel approach is proposed for a variable hysteresis band current controller which uses feedback techniques to achieve constant switching frequency with good dynamic response. The simulation result shows constant switching frequency and consequently the load current ripple decrease.

1. 서 론

태양에너지는 지상에서 에너지 밀도가 1m<sup>2</sup> 당 1 KW 정도로 낮으며 자연조건에 의하여 좌우되는 등의 문제가 있으나 청결하고 고갈의 우려가 없으며 또한 지구상에 쏟아지는 양은 한 시간으로 전 인류의 연간 에너지 사용량의 2배가 될 정도로 방대한 것으로서 신 에너지 개발 과제 중에서도 가장 기대되는 에너지이다.

근년에 이르러 전력용 반도체 소자 등의 발전으로 태양에너지를 광기전력효과를 이용하여 직접 직류전력으로 변환하는 태양전지 및 모듈의 배열기술의 진보가 급속히 이루어지고, 태양전지 자체도 거의 실용화 할 수 있는 가격에 이르렀으며 지금까지 태양광발전시스템의 가장 큰 장애요소였던 태양전지의 가격과 효율은 각각 감소 및 증가추세에 있으므로 가까운 장래에 충분히 경제성 있는 시스템이 출현되리라 예상된다.<sup>[1,2]</sup> 한편, 전력전자기술의 진보는 태양광발전 제어용 전력변환시스템의 이용기술개발을 촉진하였다. 그러나 태양전지모듈이 아직까지는 고가이고 일사량, 소자온도, 부하와 같은 외부환경 등에 따라 최대출력점이 변하는 특성을 가지고 있으며 변환효율이 10수%정도밖에 되지 않기 때문에 가능한 많은 에너지를 태양전지에서 얻을 수 있도록 해야 하며, 항상 최대출력점에서 동작하도록 제어해야 할 필요가 있다. 그리고 태양전지의 출력은 직류전원이므로 상용전력계통과 같은 교류전원으로의 변환이 필요하다.<sup>[3]</sup>

기존의 히스테리시스 전류제어기는 스위칭 주파수의 변동이 심하고 영점부근에서 스위칭 주파수가 불필요하게 높아짐으로써 스위칭소자와 게이트 드라이브회로에서의 전력손실을 유발한다. 이 때문에 스위칭주파수를 일정하게 유지할 수 있는 예측전류제어방식을 제안하고 있으나 고가의 프로세서 사용이 필수적이기 때문에 현재 보급형 태양광발전시스템에서는 구성이 간단하고 저렴한 히스테리시스 전류제어방식을 채택하여 역률저하 및 전원전압 왜곡에 영향을 줄이고 있다.<sup>[4-9]</sup>

본 논문에서는 보급형 계통연계 태양광발전 시스템을 위한 양방향성 PWM 인버터의 이론적 고찰과 제어알고리즘에 대하여 고찰하였고 기존의 히스테리시스 전류제어기법의 장점을 유지하면서 삼각파 비교방식에서 마이플라와 유니플라의 특성을 갖도록 구현하였으며 밴드폭

을 최소로 하기위해 수학적 모델링으로 밴드폭을 소거함으로써 스위칭에 의한 전류리플이 감소됨을 시뮬레이션을 통해 이론적 타당성을 입증하였다.

2. 히스테리시스 전류제어 인버터

2.1. 보급형 계통연계 태양광발전시스템

계통연계형 태양광발전시스템은 부하에 전력을 공급하기 위해 계통선과 병렬운전을 하는 시스템으로서 DC 전원과 AC 부하사이의 전력을 균형있게 유지하기 위해 계통선을 이용하는 것이다. 만일 연계형 인버터의 출력이 부하가 필요로 하는 AC 전력보다 클 경우 그 잉여전력은 계통선상의 다른 부하에 공급하기 위하여 계통선으로 공급한다. 만일 인버터의 출력이 부하가 필요로 하는 AC 전력보다 적을 경우 부족한 전력은 자동적으로 계통선에서 공급 되어진다. 따라서 태양전지 어레이로부터의 직류전력을 저장하기 위한 비싸고 효율적이 축전지를 사용할 필요가 없으며 태양전지 어레이와 계통선 사이에 변압기를 통한 전기적인 절연을 행할 수 있다.

그림1은 태양전지로부터 직류전압을 공급받는 태양전지부, 일정전압을 출력하기 위한 DC-DC converter부, 교류전압으로 변환되는 PWM인버터부, 전원측 절연변압기, 부하 및 상용전원으로 구성된 계통연계형 태양광발전시스템의 블록도를 나타낸다.

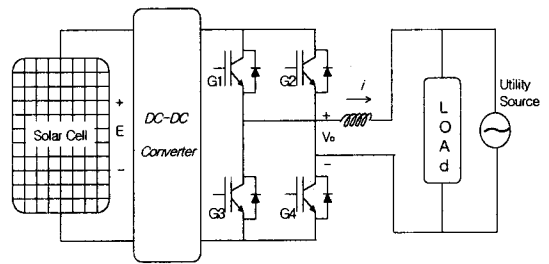


Fig.1 Block diagram of grid-connected photovoltaic sys

2.2. 히스테리시스 전류제어

그림2는 히스테리시스 제어기의 제어블럭도로서 전류 기준신호를 기준으로 일정한 밴드를 설정하고 이 밴드내에서 전류가 흐르도록 스위칭 상태를 제어하는 기법으로서 전류오차의 크기가 인버터의 입력전압을 결정하는 일종의 뱅뱅제어기이다.

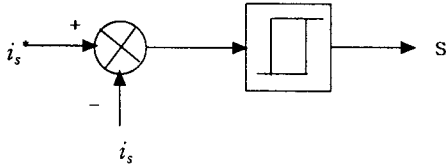


Fig.2 Hysteresis control technique

### 2.2.1. 바이폴라 히스테리시스 전류제어

바이폴라 히스테리시스 전류제어기는 그림1에서 G1, G4가 스위치를 동시에 ON시켜 전류는 감소하고 G2, G3이 스위치를 동시에 ON하여 전류를 증가시키는 방식으로 스위칭의 한 주기 동안 4개의 스위치를 ON, Off하게 된다. 이와 같은 바이폴라 스위칭 패턴은 표 1과 같다.

Table 1. Switching pattern of bipolar hysteresis current

전류상태	$i^* > 0$				$i^* < 0$			
	↗	↘	↗	↘	↗	↘	↗	↘
SW <sub>ON</sub>	2, 3	1, 4	2, 3	1, 4	2, 3	1, 4	2, 3	1, 4
$V_{AB}$	$-V_{dc}$	$V_{dc}$	$-V_{dc}$	$V_{dc}$	$-V_{dc}$	$V_{dc}$	$-V_{dc}$	$V_{dc}$
	↗ : 전류증가 상태    ↘ : 전류감소 상태							

### 2.2.2. 유니폴라 히스테리시스 전류제어

유니폴라 히스테리시스 전류제어기는 전류의 방향에 따라서는 4개의 스위치 중 한 개만을 ON시킬 때 스위치의 교류측에 걸리는 전압  $V_0$ 가 0이 되어 전원전압  $V_s$ 만으로 환류하는 순간이 있음을 이용하여 기존의 히스테리시스 전류제어기의 단점을 극복하였고 유니폴라 스위칭 패턴은 표 2와 같다.

Table 2. Switching pattern of unipolar hysteresis current

전류상태	$i^* > 0$				$i^* < 0$			
	↗	↘	↗	↘	↗	↘	↗	↘
SW <sub>ON</sub>	2	×	3	×	×	4	×	1
$V_{AB}$	0	$V_{dc}$	0	$V_{dc}$	0	$V_{dc}$	0	$V_{dc}$
	↗ : 전류증가 상태    ↘ : 전류감소 상태				×			
	: 모든 스위칭 off 상태							

### 2.2.3. 히스테리시스 제어기 설계

그림 3은 계통연계형 태양광발전시스템의 전원측 전류와 태양광 인버터의 출력 전압을 나타낸다. 밴드폭을 최소화하기 위해 PWM 기법의 바이폴라와 유니폴라 PWM 기법과 같이 유니폴라 히스테리시스기법을 적용하였다.

밴드폭을 가변하여 일정주파수를 얻기위한 전개 과정은 다음과 같다.

그림 3으로 부터 선전류  $i$ 와 인버터 출력전압  $V_0$ 사

이에는

$$V_0 = L \frac{di}{dt} + e \quad (1)$$

의 관계식이 성립하고, 전원전류  $i$ 가 기준전류  $i^*$ 를 추종하기 위한 기준전압

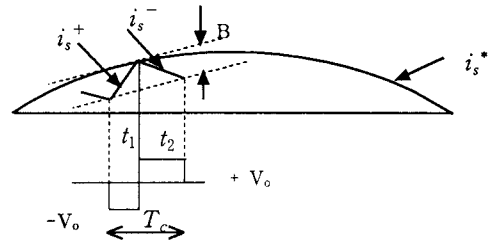


Fig. 3 Current and switch waveform at hysteresis control

$$V_0^* = L \frac{di^*}{dt} + e \quad (2)$$

따라서, 전원측 전류와 기준 전류차를

$$\alpha = i^* - i \quad (3)$$

라고 하면, 식 (1)과 식 (2)로부터 기준전압과 인버터 출력전압의 차는

$$V_0^* - V_0 = L \frac{d(i^* - i)}{dt} = L \frac{d\alpha}{dt} \quad (4)$$

로 나타낼 수 있다.

그림 3으로부터  $i^* > 0$ 인 경우 시간구간 ( $0 < t < t_1$ ) 동안에 인버터 출력전압은  $V_0 = E$ 이며 이 관계를 식 (4)에 대입하면

$$V_0^* - E = L \frac{d\alpha}{dt} = L \frac{\alpha(t_1) - \alpha(0)}{t_1 - 0} = -\frac{LB}{t_1} \quad (5)$$

이고, 시간구간 ( $t_1 < t < T$ ) 동안에 인버터 출력전압은  $V_0 = 0$ 이며 이 관계를 식 (4)에 대입하면

$$V_0^* = L \frac{d\alpha}{dt} = L \frac{\alpha(T) - \alpha(t_1)}{T - t_1} = \frac{LB}{T - t_1} \quad (6)$$

과 같이 나타낸다.

식 (5)와 식 (6)으로부터 스위칭 한 주기에 대한 관계식은 다음과 같이 얻어진다.

$$T = \frac{LB}{V_0^*} + \frac{LB}{E - V_0^*} = \frac{ELB}{EV_0^* - (V_0^*)^2} \quad (7)$$

여기서,  $B = B_{\max}[EV_0^* - V_0^*]$ 로 설정하면

$$B = \frac{T}{EL} [E(L \frac{di^*}{dt} + e) - (L \frac{di^*}{dt} + e)^2] \quad (8)$$

여기서, E, L은 상수이고,  $f_s = \frac{1}{T}$ 에서 스위칭 주수는 일정하게 된다. 또한,  $i^* < 0$ 인 경우 시간구간 ( $0 < t < t_1$ ) 동안에 인버터 출력전압은  $V_0 = -E$ 이며 이 관계를 식 (4)에 대입하면

$$V_0^* + E = L \frac{d\alpha}{dt} = L \frac{\alpha(t_1) - \alpha(0)}{t_1 - 0} = \frac{LB}{t_1} \quad (9)$$

이고, 시간구간 ( $t_1 < t < T$ ) 동안에 인버터 출력전압은  $V_0 = 0$ 이며 이 관계를 식 (4)에 대입하면

$$V_0^* = L \frac{d\alpha}{dt} = L \frac{\alpha(T) - \alpha(t_1)}{T - t_1} = -\frac{LB}{T - t_1} \quad (10)$$

식 (10)과 같이 나타낸다.  
 식 (9)와 식 (10)으로부터 스위칭 한 주기에 대한 관계 식은 다음과 같이 얻어진다.

$$T = -\frac{LB}{V_0} + \frac{LB}{E+V_0} = -\frac{ELB}{EV_0+(V_0)^2} \quad (11)$$

여기서,  $B = B_{\max}[EV_0 + V_0^2]$ 로 설정하면

$$B = -\frac{T}{EL} [E(L \frac{di^*}{dt} + e) + (L \frac{di^*}{dt} + e)^2] \quad (12)$$

여기서, E, L은 상수이고,  $f_s = \frac{1}{T}$ 에서 스위칭 주파수는 일정하게 된다.

### 3. 시뮬레이션 및 결과

#### 3.1. 시스템의 구성

연계형 태양광발전시스템의 인버터의 전압과 전류를 센서링하여 히스테리시스 밴드를 출력의 상위  $i_{ref} + B/2$ 와  $i_{ref} - B/2$ 로 설정하여 비교기로 기준전류와 검출전류를 비교하여 게이트에 스위칭 신호로  $G_1$ 과  $G_4$ 에 공급하며, 상용주수로  $G_2, G_3$ 에 공급하도록 하였다. 밴드 B는 식(8)과 식(12)에서

$$B = T \frac{di^*}{dt} + \frac{Te}{L} - \frac{TL}{E} \frac{di^{*2}}{dt} - \frac{2TL}{E} \frac{di^*e}{dt} - \frac{Te^2}{EL} \quad (13)$$

$$B = -T \frac{di^*}{dt} - \frac{Te}{L} - \frac{TL}{E} \frac{di^{*2}}{dt} - \frac{2TL}{E} \frac{di^*e}{dt} - \frac{Te^2}{EL} \quad (14)$$

식(13)에서 밴드는 전압을 센싱하고 기준전류를 미분하여 각 항에 비례상수를 취하여 기준전류  $i^* > 0$ 인 경우로 구하고  $i^* < 0$ 인 경우로 식(14)에서 각 밴드의 폭을 결정한다.

리플전류가 감소되고 일정주파수가 됨을 확인하기 위해 시뮬레이션을 수행하였으며 직류전압 E가 일정하고 가정하였으며 각 파라미터는 표3과 같다.

Table3. Simulation parameter

DC 입력전압	$E=200\text{ V}$
인덕턴스	$L=5\text{mH}$
스위칭 주파수	$f_s=10\text{kHz}$
상용전원	$V_s=100\sqrt{2}\sin\omega t$
기준전류	$i^*=10\sqrt{2}\sin\omega t$

#### 3.2. 결과 및 고찰

그림4는 상용계통전압과 인버터 전류파형을 나타낸 것으로 서로 동위상이 됨을 알 수 있다. 그림 5는 히스테리시스 밴드폭을 가변함으로써 스위칭 주파수가 일정하게 나타남을 보이고 있다.

그림 6은 유니폴라 히스테리시스 방식의 출력전압 및 파형을 나타내며 그림 7은 가변히스테리시스 전류파형으로 전류의 밴드폭이 일정하지 않고 가변됨을 나타내고 있다.

그리 8은 한 주기에서의 고정 히스테리시스 전류파형을 나타낸 것으로 밴드의 폭은 일정하지만 스위칭 주파수가 일정하지 않은 반면에 그림 9는 밴드의 폭이 가변되어 일정한 스위칭이 이루어짐을 볼 수 있다.

그림 9는 고정된 히스테리시스 전류의 FFT 분석으로

리플이 넓은 영역에서 랜덤하게 분포되어짐을 나타내며 가변히스테리시스 전류의 FFT 분석을 나타낸 그림 10에서는 스위칭 주파수가 10kHz에 분포된다.

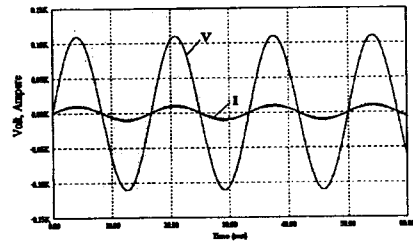


Fig. 4 Utility voltage and inverter current waveform

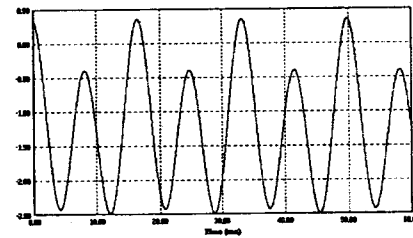


Fig. 5 Hysteresis band width

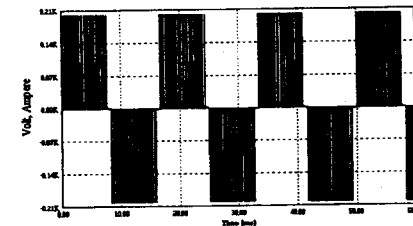


Fig. 6 Output voltage and current waveforms of unipolar hysteresis

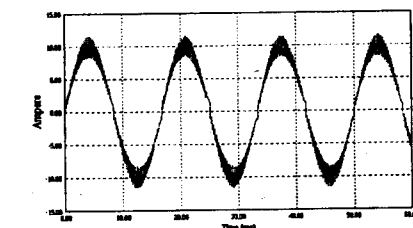


Fig. 7 Variable hysteresis current waveform

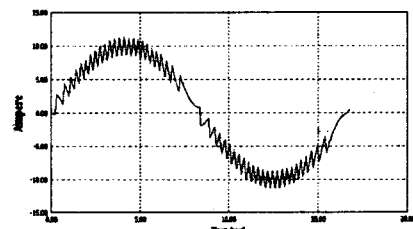


Fig. 8 Fixed hysteresis current waveform

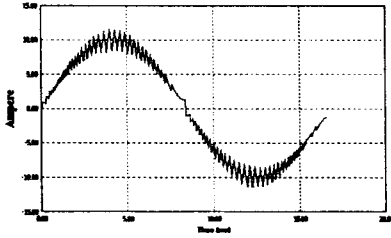


Fig. 9 Variable hysteresis current waveform

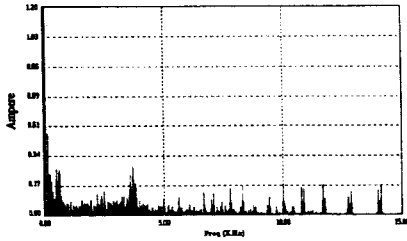


Fig. 10 Fixed hysteresis FFT analysis

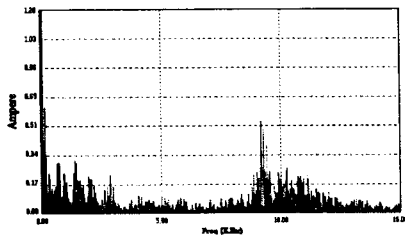


Fig. 11 Variable hysteresis FFT analysis

#### 4. 결 론

본 논문은 계통연계형 태양광 발전시스템을 위한 히스테리시스 전류제어 인버터의 이론적 고찰과 제어알고리즘에 대해서 검토 분석하였으며, 전류제어기법으로는 유니폴라 히스테리시스기법을 적용하여 시뮬레이션한 결과 다음과 같은 결과를 얻었다.

기존의 히스테리시스 전류제어방식의 장점을 유지하면서 세가지의 단점, 즉 스위칭 시간지연의 존재, 영점부근에서는 스위칭주파수가 불필요하게 높아짐으로써 스위칭에 많은 무리를 주게되어 스위칭소자와 게이트 드라이브 회로에서의 전력손실을 유발한다. 따라서 스위칭주파수를 일정하게 유지할 수 있는 가변밴드폭을 설정하여 일정한 스위칭 주파수를 갖도록 유니폴라 히스테리시스 전류제어기법을 제안하였으며 본 논문에서 제안한 유니폴라 히스테리시스 전류제어기법은 스위칭효율을 향상시킬 수 있고 스위칭시간지연을 없앨 수 있었다.

또한 밴드 폭을 최소화하기 위하여 수학적으로 소거함으로써 스위칭에 의한 리플을 감소시키고 동시에 시스템을 경량화할 수 있어 보급형 태양광 발전시스템에 적용성을 검증하였고 스위칭소자의 교류측에 걸리는 전압의 변동이 반으로 줄어 스위칭에 의한 전류리플이 감소됨을 시뮬레이션을 통해 이론적 타당성을 입증하였다.

- [1] Azeddine Draou, : A New State Feedback Based Transient Control of PWM AC to DC Voltage Type Converters, IEEE Trans on Power Electronics, Vol.10.pp716-724,1995
- [2] F.Lasine, et al.,:Solar Photovoltaic Hand Book, Energy Technology Division Asian Institute of Technology, 1988.
- [3] R.P. Jashi, B.K. Bose,:Base/Gate Drive Suppression of inactive Power Devices of Voltage Fed Inverter and Precision Synthesis of AC Voltage and DV Link Current wave, IEEE IECON 90,pp. 1024-1040,1990
- [4] Hideki Jonokuchi, Kazuo Nagatake, : A carrier Frequency Modulation Method for Sinusoidal PWM Inverter, IEEE IECON88, pp.678-683,1988.
- [5] J. Schmid,:Real Energy Production of Residential Potovoltaic System, Technical Dugest of the International PVSEC-7, pp.359-362,1993
- [6] Mohan, undeland, Robbins, : POWER Electronics, Wiley, Secon<sup>o</sup> Edition 1995
- [7] Eric person, Ned Mohan, B. Ben Banerjee, : Adaptive Tolarence-Band Current Control of Standby Power supply Provides Load-Current Harmonic Neutralization" IEEE PESC, pp 320~328,1992.
- [8] Bimal,K. Bpse, : An Adaptive Hystereis-Band Current Control Technique of  $\square$  Voltage-Fed PWM Inverter for Machine Drive System. IEEE Trans, on Industrial Electronics VOL. 37, pp.684-689, 1990
- [9] Qunying Yao, D.G. Holmes, : A Simple Novel Method for Variable-Hystersis-Band Current Control of a Three Phase Inverter with Constant Frequency. IEEEIAS, pp. 1122~1129,1993.