

瞬時直電流追從制御形 Inverter의
太陽光發電 시스템에의 應用

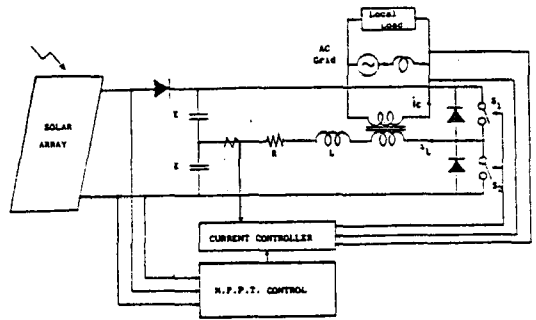
유 권 중 , ° 정 명 웅 , 송 진 수
(한국동력자원연구소)

Application of Instantaneous sinusoidal current tracking control inverter for photovoltaic system

Yu Gwon Jong , Jung Myung Woong , Song Jin Soo
(Korea Institute of Energy and Resources)

Abstract :

A sinusoidal PWM type inverter using IGBT and a new instantaneous current tracking control strategy is described. Its utilization as an interface for a grid-connected photovoltaic system with maximum power tracking capability is explained, and computer simulation along with waveforms are discussed. Finally, experimental results are analysed by state space average method to actual grid-connected systems.



1. 서론

태양광발전 시스템은 이용형태에 따라 독립형(stand-alone) 과 계통선 연결형(grid-connected) 으로 구분될 수 있으나, 향후 태양전지의 가격 저감을 위한 기술개발이 이루어질 경우 계통선 연결형중 추력용의 소규모 분산형 태양광발전 시스템이 가장 유망한 응용분야로 기대되고 있다.

이러한 시스템의 이용 효율을 향상하기 위하여 본 논문에서는 태양전지 array 와 상용 전력계통을 연계하는 순시직전류 추종형 inverter 를 제안하였다.

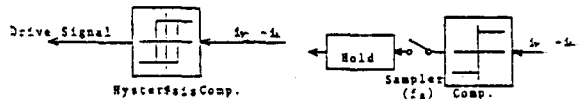
구체적인 적용기술을 위하여 상태변수 평균화법을 도입한 인버터의 동작특성해석 및 순시정현파 전류의 기준 가이드라인 추종조건 도출을 시도하였으며, 실제로 태양광발전 시스템에 적용한 실험 결과를 검토하였다.

2. 순시직전류 추종 제어형 인버터

<그림 1> 은 순시직전류 추종 제어형 인버터를 태양광 발전 시스템에 적용한 경우의 구성도를 나타내고 있다.

순시직전류 추종제어형 인버터는 상하의 arm switch

<그림 1> 순시직전류 추종형 인버터를 이용한 태양광발전 시스템



(a) Hysteresis band 제어방식 (b) Latch 제어방식

<그림 2> 전류 추종 제어방식

를 사용하여 기준 정현파 전류가 부하전류를 추종함으로써 인버터 출력전류를 정현파로 제어하는 방식이다. 이러한 제어방식에는 <그림 2> 에 나타난 바와같이 Hysteresis band 제어와 Latch 제어방식의 두가지 종류가 있다.

인버터의 부하로서 전력계통을 이용할 경우 전력계통에 따라서는 부하전류가 기준전류에 추종하지 않는 영역이 존재하여 부하전류의 기본파 성분이 저하될 수도 있다. 이러한 경우 고조파 성분이 증가하여 전류의 리플이 증가하는등 시스템의 전체적 손실이 증가하는 문제

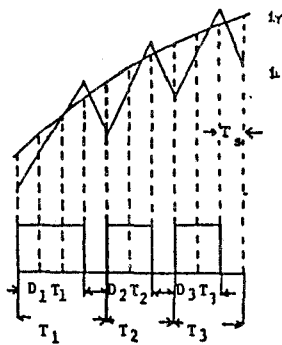
점이 발생한다.

이러한 문제점을 개선하기 위하여, 효과 해석에 많이 이용되고 있는 상태변수 평균화법을 태양광 발전 시스템 해석에 도입하였으며, 인버터 입력 직류전압과 전력계통과의 상관성으로 인버터 동작영역의 특성 해석을 시도하였다.

3. 인버터에 적용한 상태변수 평균화법

Hysteresis band 제어방식과 Latch 제어 방식에서는 인버터의 스위칭에 따른 mode 변화시간을 정확히 알 수 없으므로 시스템 해석에 어려움이 따른다.

평균화법에서 필요로 하는 파라미터는 Duty(시비율)이며, 스위칭 주기는 회로의 고유주기 혹은 시정수에 비하여 대단히 적을 경우, 스위칭 주기를 일정 주기로 보아도 무방하다. 물론 Hysteresis band 와 Latch 제어 방식의 인버터에서는 Duty 라는 파라미터는 실존하지 않지만 <그림 3> 과 같이 Latch 주파수 T_s 가 수 kHz ~ 수십 kHz 의 고주파일 경우 인버터는 일정 Duty 로써 스위칭할 수 있다고 가정할 수 있으므로 가정된 Duty 로써 상태 방정식을 평균화하여 추종 영역을 산출할 수 있다.



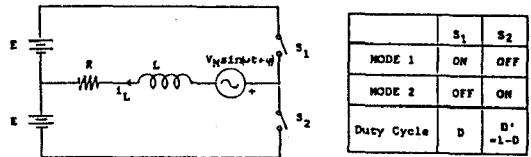
T_s : Latch Cycle

<그림 3> 가상 Duty Cycle

3.1 전력계통부하시의 상태변수 평균화법에 의한 해석

<그림 4> 와 같이 Half-Bridge Inverter 의 부하가 전력계통 부하일때의 해석회로 모델로 평균화법에 의해 해석하면 다음과 같다.

회로 mode 는 S1, S2 를 순차적으로 ON/OFF 시켰을 때 회로 방정식으로서 i_L 의 증가모드와 i_L 의 감소



<그림 4> 회로 동작 Mode

mode 의 2 개의 mode 가 존재한다. 회로방정식은

$$\text{Mode 1: } \frac{di_L}{dt} = -\frac{R}{L} i_L + \frac{E}{2L} - \frac{V_m}{L} \sin(\omega t + \phi) \dots (1)$$

$$\text{Mode 2: } \frac{di_L}{dt} = -\frac{R}{L} i_L - \frac{E}{2L} - \frac{V_m}{L} \sin(\omega t + \phi) \dots (2)$$

단, 전력계통은 전압원으로서 $v = V_m \sin(\omega t + \phi)$ 로 가정한다.

ϕ 은 계통전압 v 와 부하전류 i_L 과의 위상차 이다. i_L 의 증가 mode duty 를 D 라고 하면 i_L 감소 mode duty D' 는

$$D' = 1 - D \quad (1 \leq D \leq 0) \dots (3)$$

평균화법에 의해 평균화 전류 \hat{i}_L 은

$$\frac{d\hat{i}_L}{dt} = -\frac{R}{L} \hat{i}_L (D + D') + \frac{E}{2L} (D - D') - \frac{V_m}{L} \sin(\omega t + \phi) \cdot (D - D') \dots (4)$$

여기서 기준전류 i_r 은

$$i_r = I_r \cdot \sin \omega t \dots (5)$$

(4) 식에 (5) 식을 대입하여 i_L 이 i_r 과 동등하게 되도록 D 를 구하면

$$D = \frac{1}{2} \left[\frac{2}{L} \sqrt{(RI_r)^2 + (\omega LI_r)^2 + V_m^2} + 2V_m I_r (R \cos \phi + \omega L \sin \phi) \sin(\omega t + \phi) + 1 \right] \dots (6)$$

$$\tan \phi = \frac{\omega L + V_m \sin \phi}{R + V_m \cos \phi}$$

(6) 식으로 부터 (3) 식이 관계가 성립하기 위해서는 다음의 조건이 도출된다.

$$E \geq \sqrt{(RI_r)^2 + (\omega LI_r)^2 + V_m^2} + 2V_m I_r (R \cos \phi + \omega L \sin \phi) \dots (7)$$

따라서 (7) 식은 전력계통 부하의 경우 기준 정현파전류 추종 인버터의 추종 조건이며, 등호가 성립하는 조건을 여유이 적은 최적 추종조건이라 할 수 있다. 여기서 계통전압 v 와 인버터 출력전류 i_L 을 동위상인 역률 1 로 제어하기 위하여 PLL 제어를 함으로서 $\phi = 0$, 또는 계통측을 부하로 생각하면 R 은 손실이기 때문에 R 을 충분히 적게하여 R = 0 로써 (7) 식을 변형하면

$$E \geq \sqrt{(\omega L I_r)^2 + V_m^2} \geq \omega L I_r \dots (8)$$

로 된다.

본 인버터의 부하전류 i_L 은 (1) 과 (3) 식을 이용하여 구할 수 있으며 계통전압이 일정 하다고 가정했을 때 인버터의 부하전류는 다음과 같다.

$$i_L(t) = \frac{\frac{E}{2} - V_m \sin(\omega t + \theta)}{R} + (i_L(t_0) - \frac{\frac{E}{2} - V_m \sin(\omega t + \theta)}{R}) e^{-\frac{R}{L}t} \dots (9)$$

(9) 식에서 $\frac{R}{L}t \ll 1$ 이라고 하여 급수 전개를 하면 전류 $i_L(t)$ 는

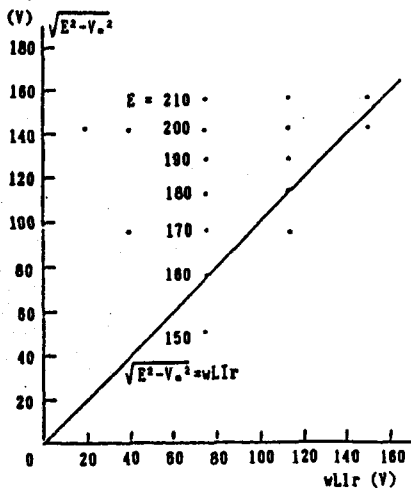
$$i_L(t) = (1 - \frac{R}{L}t) i_L(t_0) + \frac{\frac{E}{2} - V_m \sin(\omega t + \theta)}{L} \dots (10)$$

로 된다.

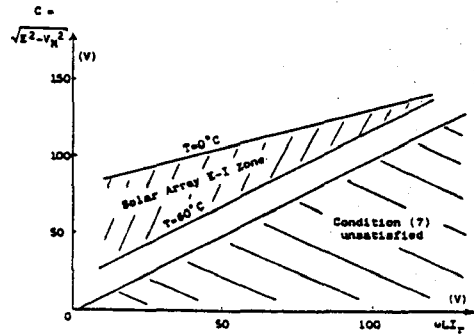
4. 시뮬레이션 및 실험 결과

이와같은 평균화법을 이용한 해석을 토대로한 시뮬레이션 결과는 다음과 같다. 즉, (10) 식을 만족하는 추종 동작 영역은 <그림 5> 와 같으며, <그림 6> 은 <그림 5> 의 추종 동작 영역에서의 최대 출력점으로 되는 전력-전류 특성과 온도 특성에 대한 영역을 내고있다.

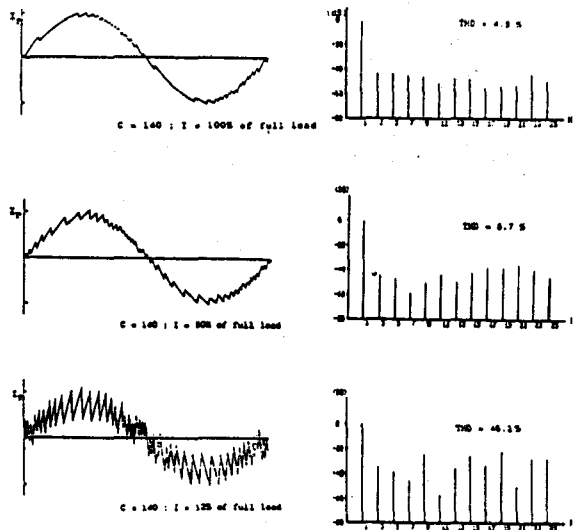
<그림 7> 은 <그림 5> 의 각 점에 있어서 시뮬레이션 전류파형과 주파수 스펙트럼을 나타내고 있다. 이러한 해석결과로부터 본 인버터를 태양광발전 시스템에 응용하기 위하여 최대전력 추종제어 기능을 부과한 전력계통과 연결한 태양광발전 시스템을 제작 실험하였다.



<그림 5> 추종 동작 영역



<그림 6> 전력-전류 특성과 온도특성에 대한 동작영역

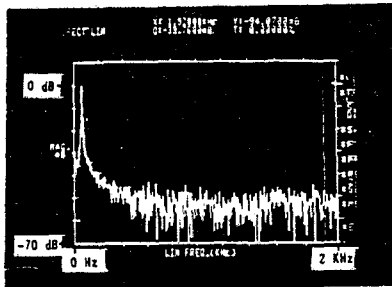
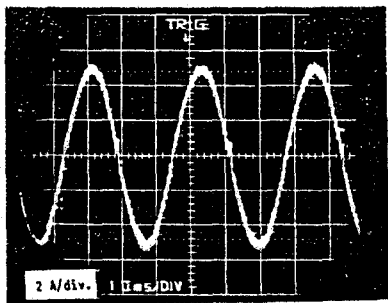


<그림 7> 시뮬레이션 전류파형과 스펙트럼

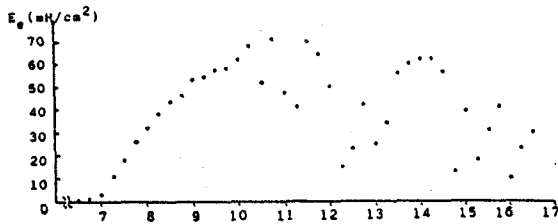
<그림 8> 은 최적 동작 영역에서의 부하 전류파형과 spectrum 결과를 나타내고 있다. 또 제안한 태양광발전용 순시직전류추종형 인버터를 이용하여 계통전류 i_c 와 인버터 출력전류 i_L 이 같은 벡터상이 되도록 위상제어를 하여 운전한 결과는 <그림 9> 에 나타내었다.

실험 결과에서 나타난바와 같이 태양전지 출력전류, 인버터 전류는 대부분 일사량 변화와 상이하게 변화하고 있는 것을 알 수 있다.

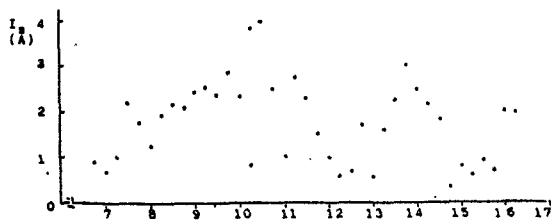
이상의 결과로부터 본 논문에서 동작 해석에 도입한 상태변수 평균화법이 인버터 시스템에 유효하게 이용할 수 있다는 것을 명확하게 확인 하였다.



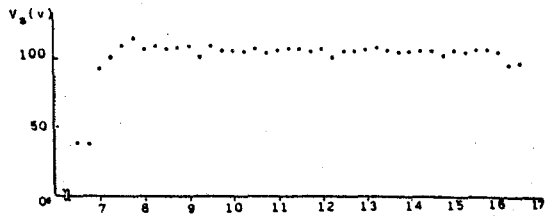
<그림 8> 최적 동작 영역에서의 부하전류 파형과 spectrum



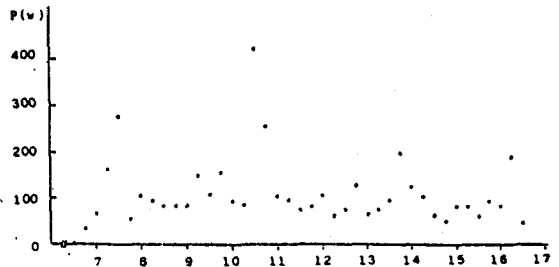
(a) 일사량



(b) 태양전지 출력전류



(c) 태양전지 출력전압



(d) 인버터에서 계통부하에 흐르는 전류

<그림 9> 시스템의 출력 Data

5. 결과

전력계통과 연결되는 소규모 분산형 태양광발전 시스템의 이용효율을 향상 시키기 위하여, 최대 출력 추종이 가능한 순시치 전류 추종형 인버터의 적용방안을 고찰한 결과는 다음과 같다.

가. 상태변수 평균화법을 도입하여 인버터 입력직류전압과 전력계통의 상관성으로 부터 인버터 동작영역의 특성을 해석 하였다.

나. 이론적 해석에 의해 도출된 정현파 전류 추종조건은 시뮬레이션 및 시스템 적용 실험을 통하여 추종조건을 만족하는 Buffer reactor 를 제어함으로서 왜율이 적은 전류파형을 얻을 수 있는 것을 확인 하였다.

참고문헌 :

1. 中岡・劉 " 瞬時正弦波電流トラッキング制御方式インバータの太陽光発電システムへの応用 " 日本電気学会半導体研究会資料SPC-85-83
2. P.Savary, M.Nakaoka and T.Marubishi "Novel type of High-Frequency Link Inverter for Photovoltaic Residential Application", IEE Proceedings Vol.1, July,1986