

태양광 발전용 인버터의 안정화 운전 특성분석

조 금 배*
조선대학교

김 한 성
건국대학교

유 권 중, 송진수
한국에너지 기술연구소

Characteristics Analysis of Stabilizing Operation of Photovoltaic Inverter

G.B Cho*
Chosun University

H.S Kim
Konkuk University

G.J Yu, J.S Song
KIER

ABSTRACT

In this paper, instantaneous current tracking control inverter is applied to photovoltaic system and then optimum operating area is described by state space average method for optimum design of maximum output control. Also control system is realized by DSP and excellence of system shows the effectiveness of inverter system using the instantaneous control method.

1. 서론

태양광 발전시스템은 환경오염의 염려가 없으며 시스템이 단순하여 미래 에너지 문제 및 환경문제 해결의 일익을 담당할 유망한 전력공급 시스템으로서 가까운 장래에 실용화 보급이 기대되고 있다. 태양광 발전시스템은 특성상 출력의 불안정성과 기후에 의존성을 해결 하기위해 시스템을 기존의 배전선과 연계하므로써 상용 전력계통이 태양전지의 출력변동을 완충시켜주며 우천또는 야간에 부족전력을 안정되게 공급한다. 이러한 계통연계형 시스템의 실용화를 위해서는 전력계통과 상호연계시 제 문제점을 명확히 규명하고 신뢰성있는 연계 제어기술의 확립이 요구된다. 따라서 그 부분적 특성을 검토하고 이에 부합하는 제어성능을 지닌 인버터회로를 설계 제작하고자 본 논문에서는 태양광 발전용 인버터로서 순시치 전류제어형 인버터를 채용하였다. 인버터의 부하로서 전력계통을 이용할 경우 전력계통에 따라서는 부하전류가 기준전류에 주종하지 않는 영역이 존재하여 부하전류의 기본파 성분의 저하와 왜율을 많이 포함하게 된다. 이것은 인버터 입력전압의 변화와 대소에 따라서 현저하게 나타나며 이러한 경우 고조파 성분이 증가하여 전류의 Ripple 이 증가하는 등 전체손실이 증가하는 문제점이 발생된다.

이러한 문제점을 개선하기 위하여 상태변수 평균화법(State Space Average Method : SSAM)을 본 시스템에 적용하여 인버터의 입력전류 전압과 전력계통의 전압 전류와의 상관성으로 인버터 동작영역의 특성분석을 시도하였다. 또한 태양전지 어레이로부터 최대전력을 발전시키기 위해서 최대출력 추적제어를 필요로 하는데 이때 태양전지 어레이의 출력특성과 태양전지 Module 간의 부조화 특성도 검토 하였다.

2. 태양전지 모듈과 어레이의 출력특성과 부조화

그림 1은 태양전지 어레이의 신뢰성을 높이기 위한 연결 회로 설계 개념도를 나타내고 있다.

일반적으로 태양전지 어레이의 구성은 부하측에서 요구

하는 전압과 전류의 크기에 의해서 직·병렬 연결 태양전지 모듈 수가 결정된다. 이와 같이 단순히 직·병렬 연결 수만을 구해서 태양전지 어레이를 구성하면 불균일한 태양전지 모듈 특성이 어레이의 성능에 미치는 영향과 모듈이나 어레이가 부분적으로 가려져 회로가 비정상적인 동작상태에 들어가는 경우등이 거의 고려될 수 없다. 태양전지회로의 전기적 특성은 회로를 구성하고 있는 소자의 전류와 전압 특성을 합성한 전류-전압 특성으로 나타나며, 태양전지의 직·병렬 연결상태 및 전류-전압특성, 역류방지 다이오드와 Bypass다이오드의 연결상태와 전압-전류 특성등이 종합적으로 고려되어야만 어레이의 특성을 알 수 있다.

2.1 직렬로 연결된 태양전지열에서의 특성의 부조화

그림 1은 10개의 단위 태양전지가 직렬로 연결된 태양전지열에서 손상된 하나가 열의 전류-전압 특성에 어느 정도의 영향을 끼치는지를 도시한 것이다. 그림 2에서 알 수 있는 것처럼 손상된 태양전지를 가진 태양전지열을 단락시켰을 때 정상적인 태양전지는 최대 출력점에서 정상적으로 동작하고 이들의 출력을 정상적인 태양전지측에서 볼 때 유일한 부하인 손상된 태양전지에서 소모된다.

2.2 Bypass 다이오드의 역할

태양전지가 직렬로 연결되어 있는 긴 태양전지열을 bypass 다이오드에 의해서 다시 몇개의 소열(sub-string)로 나눈다. bypass 다이오드는 태양전지열과 병렬로 연결하여 다이오드의 순방향 특성이 열의 역방향 특성이 되도록 하여 태양전지열이 정상적으로 동작할 때에는 다이오드에 역바이어스가 걸리지않는다. 실제 어레이에서는 태양전지가 모듈 단위로 연결되기 때문에 모듈이 소열역할을 하고 모듈에 내장된 보호 다이오드가 bypass 다이오드 역할을 한다.

3. 순시치 인버터의 태양광발전용 응용

3.1 시스템의 구성

그림4는 순시전류 제어형 태양광발전용 인버터의 주 회로 및 제어블럭도를 나타내고 있다.

인버터 회로방식은 Half 브리지회로 방식을 이용 하였으며 스위칭 소자는 IGBT를 채용 하였다. 인버터제어 방법에는 순시치전류제어형 PWM제어방식을 적용하여 고조파억제를 시도 하였으며 출력전류를 역율I의 정현파로 하기 위하여 전압 검출기에 의해 분압된 계통전압에 계통전압의 고조파를 제거하기 위하여 Band-Pass필터를 설치하였다. 직류전압 제어(PI제어기), 최대전력제어 (MPPT제어), 시스템스제어, 보호기능은 One Chip의 DSP(Digital Signal Processor

: TMS 32025C)에 의해서 처리하여 시스템의 고효율화, 안정화, 소형, 경량화, 저가화를 시도 하였다.

3.2 최대출력제어

태양전지 어레이의 이용효율을 높이기 위하여 교류출력전력이 일정하다는 조건하에서 최대로 되도록 태양전지 어레이의 동작전류를 이동시켜 최대출력제어를 하고 있다. 즉 최대출력제어부의 출력신호는 인버터 기준전류의 진폭 I_R 로서 출력하게된다.

3.3 필터의 검토

인버터운전에 있어서 태양전지 어레이의 전압, 전류 리플이 클 경우 그 평균 전력점은 최대전력점 안정 동작 영역을 벗어나게 되어 더욱더 리플은 크게되며 최대전력점에 대하여 출력전류의 평균치가 작게된다. 특히, 본 시스템과 같은 단상출력은 계통주파수의 2배의 맥동전력이 존재한다. 본 연구에서는 시스템 소형화, 경량화를 위해 리액터를 제거하고 콘덴서만으로 필터를 구성하여 태양 전지특성과 콘덴서 용량에 대해서 시뮬레이션에 의한 검토를 하였다.

4. 최적안정 동작영역 해석

4.1 인버터에 적용한 상태변수 평균화법

순시치전류 제어형 PV 인버터의 최적 동작영역에 대한 이론적 특성 해석을 초미 해석에 많이 사용되는 상태 평균화법이라는 근사 해석법을 도입하여 이론적 고찰을 시도 하였다. 평균화법에서 필요로하는 파라미터는 Duty(시비율)이며, 스위칭 주파수가 회로의 고유주파수 혹은 시정수에 비하여 대단히 적을 경우 스위칭 동작 주기를 일정 시간 주기로 가정하여 가정된 duty로써 상태 방정식을 평균화하여 안정 추종 동작 영역을 산출 할 수 있다.

	Q1	Q2
Mode 1	ON	OFF
Mode 2	OFF	ON
D의 정의	D	D'

그림 5는 그림 4의 PV시스템에 응용한 순시치 전류제어형 Half-Bridge인버터의 등가회로와 동작모드를 나타내고 있으며, i_L 의 증가모드와 감소모드에 대한 회로 방정식은

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

$$\text{모드 2 : } \frac{di_L}{dt} = -\frac{R}{L} i_L - \frac{E}{2L} - \frac{V_M}{L} \sin(\omega t + \phi) \quad (2)$$

전력계통은 전압원으로서 $V = V_M \sin(\omega t + \phi)$ 로 가정하고 있다. ϕ 는 계통전압V와 부하전류 i_L 과의 위상차이며, 역률 1제어를 할때 ϕ 는 0이다. i_L 의 증가모드의 시비율을 D라고 하면 i_L 의 감소모드 시비율을 $D'(1-D)$ 로 하여 D 는 $1 \leq D \leq 0$ 의 조건을 만족 하여야 하는 이러한 D의 시비율 개념을 도입하여 평균화법에 의하여 평균화된 전류 i_L 과 기준전류 i_R 이 동등($i_R = i_L$)하게 되도록 D를 구하여 $1 \leq D \leq 0$ 의 조건을 적용하면 3식과 같이 정리할 수가 있다.

$$E \geq \sqrt{(Ri_R)^2 + (\omega L i_R)^2 + 2V_M i_R (R \cos \phi + \omega L \sin \phi)} \quad \dots (3)$$

따라서 (3)식은 전력계통 부하에서의 순시치 전류제어형 인버터의 안정동작조건이다. 여기서 계통전압V와 인버터

출력전류 i_L 를 동위상인 역률 1제어를 하고 있기 때문에 $\phi = 0$. 또 계통 부하의 R은 손실이기 때문에 R을 충분히 작다고 가정하여 $R=0$ 로서 (3)식을 정리하면 (4)식과 같다.

$$C = \sqrt{\frac{E}{2} - V_M^2} \geq \omega L i_R \quad \dots (4)$$

4.2 정현파 추종동작영역 Simulation

(4)식을 토대로하여 동작영역을 나타내면 그림6과 같이 된다. 그림중의 비추종 동작영역에서는 추종조건 (4)식을 만족하지 못하는 영역으로서 기준정현파에 추종하지 못하고 찌그러진 전류파형으로 왜율은 많고 실패치는 적은 파형으로 된다.

그림 7은 태양전지 온도특성과 전력-전류특성에 대한 추종동작 영역을 나타내고 있다. 그림 6의 각점에 있어서 전류파형을 Simulation한 결과를 그림 8에 나타내고 있다. 그림 8의 전류파형으로 부터 알 수 있듯이 그림 7의 E(인버터 입력전류 전압)의 값이 크게되면 전류파형의 Ripple이 크게되며 왜율이 큰 파형으로 된다. 그림 7의 임계치가 가까우면 왜율이 적은 양질의 파형을 출력할 수가 있다는 것을 알 수가 있다.

4.3 Simulation 결과에 대한 파형평가

태양전지 특성은 일사량에 대하여 I_s 는 크게 변화하지만 V_s 는 그다지 변화하지 않는다. 태양전지 Array의 출력으로 부터 그 기준정현파에 추종하는 순시치 인버터출 구동한 경우 V_c 가 (4)식의 E에 상당하므로 $\sqrt{E^2 - V_M^2}$ 은 거의 일정하다고 생각할 수 있다.

또 I_R 은 최대전력 추종제어를 하고있기 때문에 $P_s (= V_s \times I_s)$ 에 대하여 변화한다. 따라서 왜율이 적은 파형으로 하기 위해서는 Buffer Reactor L을 가변하여 (4)식을 만족하도록 제어를 하면 왜율은 적고 속응성은 좋은 전류 전압 파형을 얻을수가 있다. 그림 9는 인버터 입력전압 $E=200V$ 에 있어서 캐리어 주파수에 왜율의 변화를 나타낸 것이다.

캐리어 주파수 f_s 가 높을수록 왜율이 낮다는 것을 알 수 있다. 그림10은 $E=200[V]$, $f_s=20KHz$ 에 있어서 L에 대한 왜율의 변화를 나타낸 것으로 파라미터는 진폭지령 I_R 이다. 또 계통전압의 첨두치는 $V_M=110V$ 이다. 이 값은 실험에 이용한 변압비와 실제계통에 연결한 값이다. $I_R=20[A]$ 에 있어서는 $L=20 \sim 30[mH]$ 에서 왜율이 최소가 되며 $I_R=30[A]$ 에 있어서는 $L=10 \sim 20[mH]$ 에서 왜율이 최소로 되어 있다. 여기서 SSAM로부터 도출된 (3)식의 동호가 성립되는 경우(임계치)는

$$E = \sqrt{(Ri_R)^2 + (\omega L i_R)^2 + V_M^2 + 2V_M i_R (R \cos \phi + \omega L \sin \phi)} \quad (5)$$

(5)식에 있어서 $R=0(\Omega)$ 실제의 실험에서는 저항을 넣음, $V_M=110[V]$, $\omega = 2\pi f = 120\pi$ 로서 $I_R=20[A]$ $I_R=30[A]$ 의 경우의 L의값을 산출하면

$$L = 22[mH] \quad (I_R=20[A])$$

$$L = 14.8[mH] \quad (I_R=30[A])$$

로 되어 simulation결과와 거의 일치하고 있으며 상태변수 평균화법(SSM)으로 부터 도출된 (3)식의 정당성을 입증하고 있다.

5. 실험 결과 및 검토

그림 11은 최적 동작영역, 안정 동작영역, 불안정 동작영역에서의 인버터 출력전류 파형과 고조파전류 분석 결과를 나타내고 있다. 그림 11로부터 상태평균화법을 적용하

여 최적 안정동작 영역에서 대해서 이론 해석결과와 타당성을 입증하고 있으며, 최적 안정동작 영역에서의 인버터 출력전압과 출력전류파형으로부터 알 수 있듯이 역류 1에서 운전되고 있으며 고조파 성분이 저하히 지니는 것을 알 수있어 본 시스템 제어방식의 양호성을 입증하고 있다.

6. 결론

태양광 발전 계통연계형 시스템의 효율적인 운전을 도모하기 위해 순시치 전류제어형 인버터를 설계 제작하여 특성에 대하여 이론적 고찰과 Simulation과 실험의 결과를 비교 검토 하였으며, 순시치 인버터의 유용성을 입증하였다. 특히 전체 제어 시스템을 DSP에 의해서 처리하여 시스템의 고효율화, 안정화, 소형 경량화를 시도하였으며 인버터 출력 파형의 고조파 함유량을 줄이기 위해 고조파 스위칭이 가능한 IGBT를 이용한 20KHz의 고조파 PWM 제어방식과 정현파 필터에 의해 기본파만으로 구성된 양질의 정현파를 얻었다. 또한 순시치 제어방식의 인버터의 동작 특성상 태양전지 어레이 출력 전압과 계통부하와의 사이에 필연적으로 존재하는 안정동작 영역과 불안정 동작영역에 대해서 사용되는 상태변수 평균화법을 도입하여 동작 특성 해석을 시도하여 향후 인버터의 이론적 고찰과 특성 해석에 새로운 해석법을 제공함과 동시에 본 연구의 이론적 결과가 유사 기종의 인버터 안전 동작영역의 도출에 크게 기여 할 것으로 사료 된다.

< 참고문헌 >

- [1]DOE: "Hand book for Battery Energy Storage Phtovoltaic Power System", SAN-2192-T1,3,(1979)
- [2] Gwonjong Yu, et al.: "Application of Instantaneous Sinusoidal Current Tracking Control Inverter to Phtovoltaic System.", Int'l PVSEC-5,8-III-3, P.661,NOV, 1990.
- [3] B.K.Bose, et al.: "Microcomputer Control of Residential Photovoltaic Power Conditioning System", IEEE Trans. Industr. Applic, IA-21, No.5(1985)

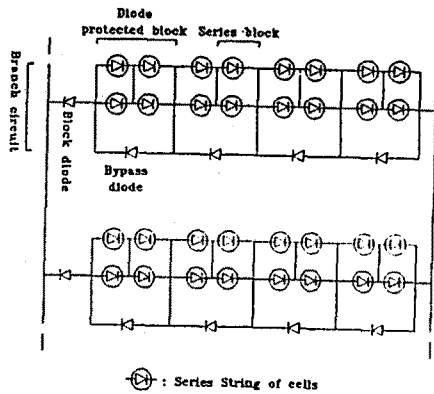


그림 1. 어레이의 신뢰성을 높이기 위한 연결회로

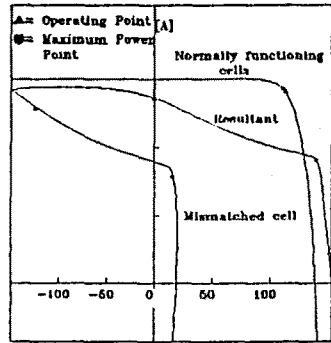


그림 2. 손상된 태양전지를 가진 태양전지열을 단락시킨 경우의 출력손실

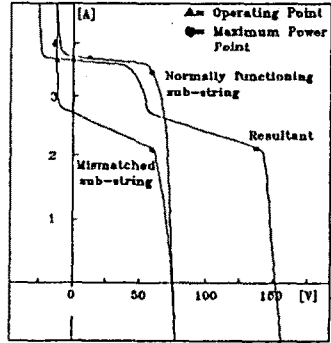


그림 3. bypass 다이오드의 역바이어스 억제 작용

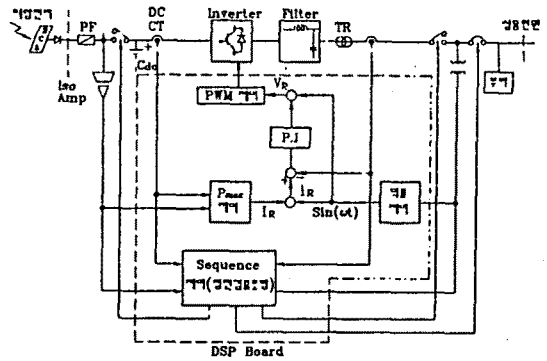
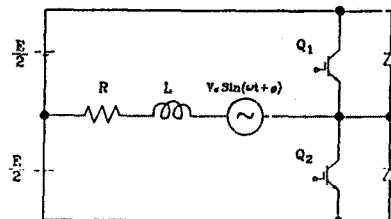


그림 4. 주 회로 구성 및 제어 블록도



	Q1	Q2
Mode 1	ON	OFF
Mode 2	OFF	ON
0의 경우	D	D'

그림 5. Half-Bridge 인버터 등가회로와 동작모드

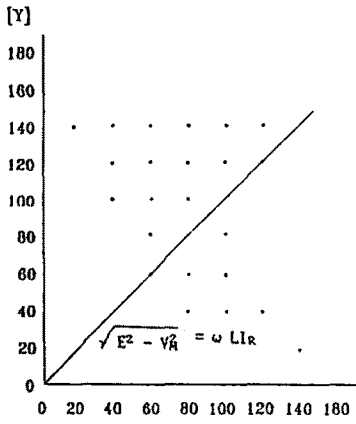


그림 6. 추종 동작 영역 ωLI [Y]

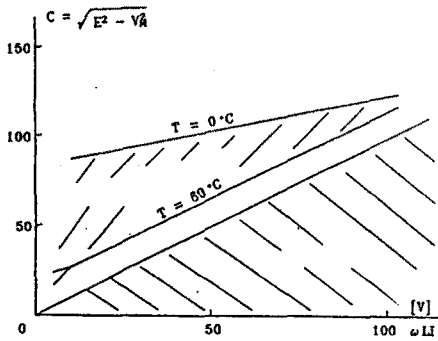


그림 7. 전력-전류특성과 온도 특성에 대한 동작 영역

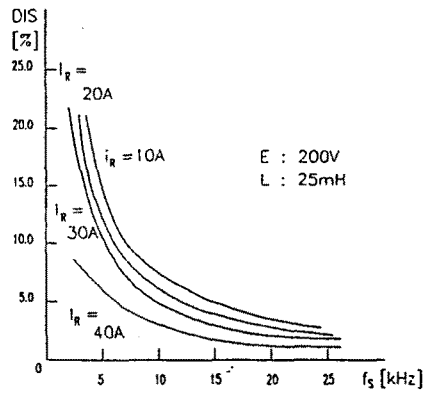


그림 9. f_s -왜율 특성

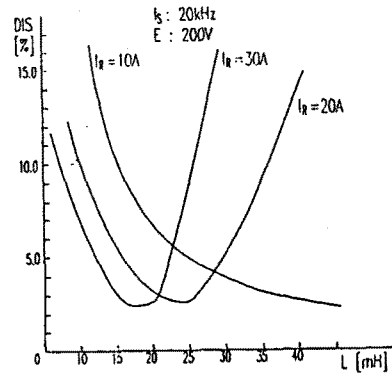
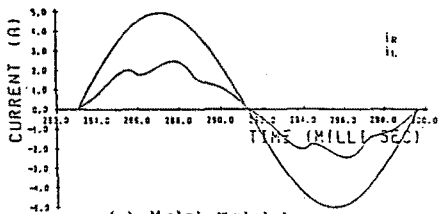
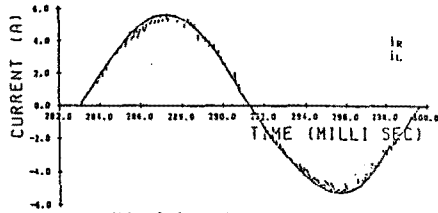


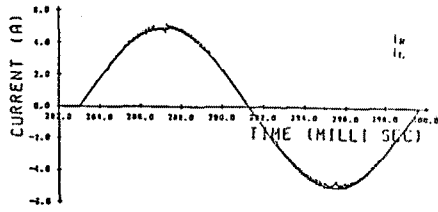
그림 10. L-왜율 특성



(a) 불안정 동작영역

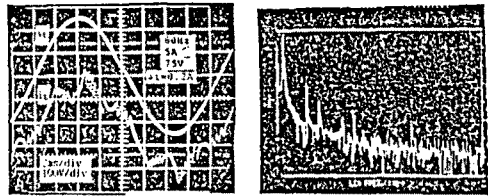


(b) 안정 동작영역

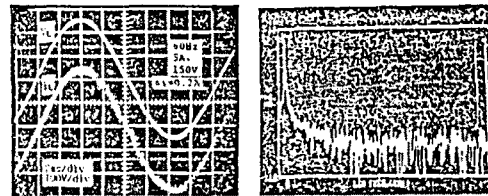


(c) 최적안정 동작영역

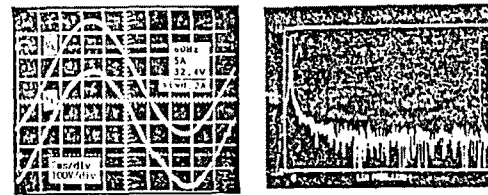
그림 8. 시뮬레이션에 의한 전류파형



(a) 불안정동작 영역



(b) 안정동작 영역



(c) 최적안정동작 영역

그림 11. 인버터를 출력전압, 전류 및 고조파 분석 결과