

# Solar Power System의 인버터 토폴로지 및 제어 모드에 따른 안정도 연구

이 승현\*, 정 교범\*, 조 보형\*\*  
 홍익대학교 전기공학과\*, 서울대학교 전기공학부\*\*

## Stability of Solar Power System on the Control Modes of a Forced-Commutated Inverter and a Line-Commutated Inverter

Seung-Hyun Lee\*, Gyo-Bum Chung\*, Bo-Hyung Cho\*\*  
 Dept. of Electrical Eng. Hongik Univ.\*, School of Electrical Eng. Seoul National Univ.\*\*

### Abstract

Solar power systems have become popular in the modern electric energy system. In order to supply the DC power, generated by solar cells, to the electric power system, the solar power system requires DC-to-AC power conversion. A line-commutated inverter or a forced-commutated inverter can be used in the DC-to-AC power conversion. Because of the nonlinear V-I characteristics of the solar cells, multiple operating points determined by the control mode of the inverter exist in the DC V-I state plane of the solar power system. In this paper, the stability of utility-interactive solar power system with a line-commutated inverter is analyzed at various operating points, using the eigenvalue method and the state-plane analysis technique. The stability of a forced-commutated inverter case is also analyzed and compared to that of the line-commutated inverter case.

비선형 전압-전류 특성을 갖는 SA는 DC 인터페이스와 인버터를 통해서 전력계통에 에너지를 공급한다. DC 인터페이스는 SA의 출력전류 및 출력전압의 리플(Ripple)을 제한하는 필터의 역할을 한다. 인버터는 직류/교류 전력 변환을 수행하며, 전력계통으로 전달되는 전력을 제어한다.

SA가 부하에 전력을 공급할 때, 다수의 동작점이 가능하며, 각 동작점의 안정도는 부하 특성에 따라 다르다 [1]. 부하 특성은 전력을 제어하는 인버터의 제어모드에 의해서 결정되며, 인버터는 자연전류방식 인버터와 강제전류방식 인버터가 사용된다 [2,3]. 본 논문은 SA의 비선형 특성과 인버터의 제어 모드에 의해서 결정되는 다수의 동작점에서 안정도 해석을 수행하며, 자연전류형 인버터의 경우와 강제전류형 인버터의 경우를 비교하였다.

### 1. 서론

Solar Cell Arrays (SA)의 DC 출력을 전력계통에 공급하기 위해서 강제전류형 인버터를 사용한 Solar Power System (SPS)의 구조는 그림 1과 같다.

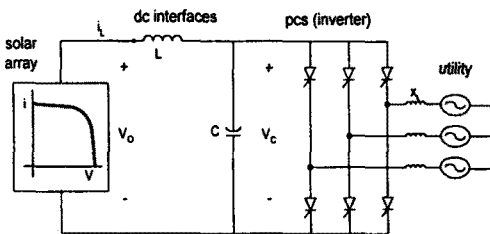


그림 1. 강제전류형 인버터를 사용한 SPS

### 2. 인버터 제어 모드에 따른 부하 특성

SPS에 연결된 전력계통은 인버터의 제어모드에 의해서 Constant Power Load ( $P_C$ ), Constant Voltage Load ( $V_C$ ), Constant Current Load ( $I_C$ ), Constant Impedance Load ( $Z_C$ )의 4 가지 부하 모델로 등가 처리된다. 그림 2는 인버터 제어 모드에 의한, SA에 연결된 부하의 전압·전류 특성을 나타낸다.

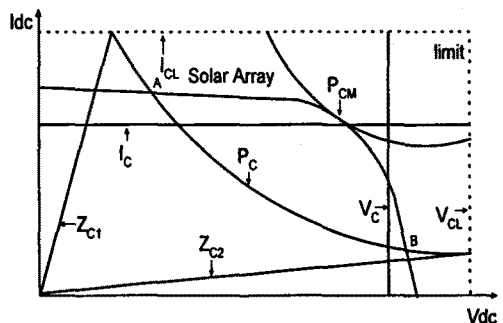


그림 2. SA에 연결된 등가부하의 전압-전류 특성

### 3. Solar Power System의 안정도

SPS의 안정도는 시스템 상수 및 동작점에서 인버터의 제어모드에 의한다. 시스템 상수는 DC 인터페이스의 인덕턴스 및 캐패시턴스, 동작점에서의 SA의 출력저항과 부하의 입력 저항값이고, 이 값들은 강제전류방식과 자연전류방식에 따라 다르다.

#### 3.1 강제전류 방식의 SPS

그림 1의 SPS는 강제전류형 인버터를 사용하여 전력계통이 요구하는 전력을 공급하며, 대부분의 경우 캐패시터 전압  $v_c$ 의 리플은 매우 작게 되도록 설계된다. 이 시스템의 동작점에서의 안정도는 식 (1)의 고유치에 의한다 [1].

$$\lambda_{1,2} = \frac{1}{2} \left[ \left( \frac{r_s}{L} - \frac{1}{r_L \cdot C} \right) \pm \sqrt{\left( \frac{r_s}{L} - \frac{1}{r_L \cdot C} \right)^2 - \frac{4}{L \cdot C} \left( 1 - \frac{r_s}{r_L} \right)} \right] \quad (1)$$

여기서  $r_s$ 는 SA의 출력저항이고  $r_L$ 은 인버터 제어 모드에 의해 결정되는 부하의 입력저항이다.

#### 3.2 자연전류 방식의 SPS

그림 3은 자연 전류형 인버터를 사용하여 DC전력을 전력계통에 공급하는 SPS를 보이며, 인덕터 전류  $i_L$ 의 리플은 매우 작게 설계된다.

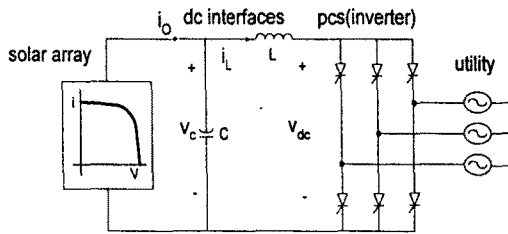


그림 3. 자연전류형 인버터를 사용한 경우

이 시스템의 동작점에서의 안정도는, 강제전류 방식과 비슷하게 유도하면, 식 (2)의 고유치에 의한다.

$$\lambda_{1,2} = \frac{1}{2} \left[ \left( -\frac{1}{r_s \cdot C} - \frac{r_L}{L} \right) \pm \sqrt{\left( -\frac{1}{r_s \cdot C} - \frac{r_L}{L} \right)^2 - \frac{4}{L \cdot C} \left( 1 - \frac{r_L}{r_s} \right)} \right] \quad (2)$$

여기서, 식 (1)과 식 (2)를 비교하면 두 시스템의 고유치는 상대적 특성을 갖음을 알 수 있다.

### 4. 최대 전력점에서 운전

SPS의 이용을 극대화하기 위해서는 SA의 최대전력 공급점에서의 운전이 요구된다. 그러나 이 점에서는  $r_s = r_L$ 이므로 고유치는 강제전류형인 경우는 식 (3)과 같고, 자연

전류형인 경우는 식 (4)와 같다.

$$\lambda_{1,2} = 0, \quad \frac{r_s}{L} - \frac{1}{r_L \cdot C} \quad (3)$$

$$\lambda_{1,2} = 0, \quad \frac{1}{r_s \cdot C} - \frac{r_L}{L} \quad (4)$$

이 경우는 0 값의 고유치가 존재하므로, 미소변동에 대한 SPS의 안정도는 문제가 된다. 따라서, SPS를 최대전력 공급점보다 작은 점에서 운전하여야 하며, 이때 동작점은 SA의 전류원 영역 또는 전압원 영역에서 형성될 수 있다.

### 5. Simulation

강제전류형 인버터 및 자연전류형 인버터를 가진 SPS를 시뮬레이션 하였고, 그 결과를 캐패시터 전압·인덕터 전류의 상태공간에 나타내었으며, 인버터 제어 모드에 따른 안정도 및 운전특성을 비교·해석하였다.

#### 5.1 강제전류 방식의 SPS

그림 4와 그림 5는 강제전류형 인버터를 사용하여, 20KW 용량의 부하를 SA에 연결하였을 때 미소변동에 대한 시스템의 응답특성을 보여준다. DC 인터페이스의 인덕턴스 L은 20μH, 캐패시턴스 C는 50μF이며, 상태제국은 미소 변동이 B점근처에서 작게 발생하였을 때에 시스템의 전압 및 전류의 상태제국은 B점을 향한다. 그러나, 미소변동이 크게 발생하면, 시스템의 전압 및 전류의 상태제국은 A점을 향하여 진행하다가, A점은 불안정하므로 시스템 전압은 붕괴된다.

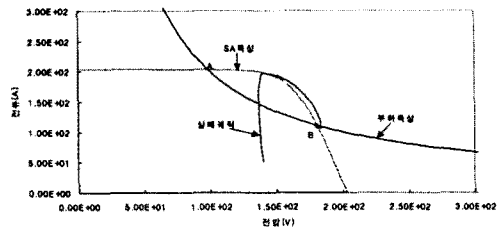


그림 4. 20KW 전력부하일 때 미소변동분 ( $\Delta V=22\%$ ,  $\Delta I=54\%$ )에 대한 상태제적, [고유치( $-2.10 \times 10^{+04} \pm j 5.19 \times 10^{+01}$ )], 동작점 ( $V_c=181V$ ,  $I_L=109A$ )

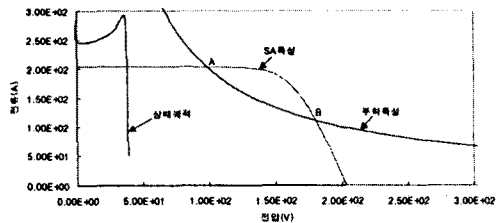


그림 5. 20KW 전력부하일 때 미소변동분 ( $\Delta V=59\%$ ,  $\Delta I=75\%$ )에 대한 상태제적, [고유치( $4.08 \times 10^{+04}$ ,  $-2.32 \times 10^{+07}$ )], 동작점 ( $V_c=98V$ ,  $I_L=203A$ )

그림 6은 강제전류형 인버터의 제어모드에 의해 부하가  $3\Omega$ 의 저항으로 등가 처리될 때의 미소 변동에 대한 시스템의 상태궤적을 보이며 SPS는 B점에서 안정됨을 알 수 있다. 그림 7은  $0.1\Omega$ 의 저항부하로 등가 처리될 때이며 동작점 A 근처에서 전류가 불안정하다.

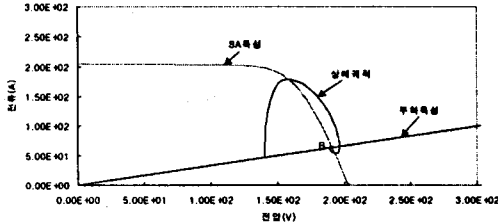


그림 6.  $3\Omega$  저항부하일 때 미소변동분( $\Delta V=27\%$ ,  $\Delta I=17\%$ )에 대한 상태궤적, [고유치( $-2.14 \times 10^{+04} \pm j 8.88 \times 10^{+01}$ )], 동작점( $V_C=190.8V$ ,  $I_L=60.3A$ )

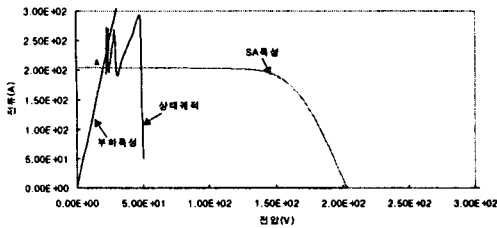


그림 7.  $0.1\Omega$  저항부하일 때 미소변동분( $\Delta V=76\%$ ,  $\Delta I=59\%$ )에 대한 상태궤적, [고유치( $-2.00 \times 10^{+05}$ ,  $-3.189 \times 10^{+07}$ )], 동작점( $V_C=20.5V$ ,  $I_L=205A$ )

그림 8은 강제전류형 인버터의 제어모드에 의해 부하가 100A의 전류원으로 등가 처리될 때의 미소 변동에 대한 시스템의 상태궤적을 보이며, 그림 9는 부하가 200A의 전류원으로 등가 처리될 때이다.

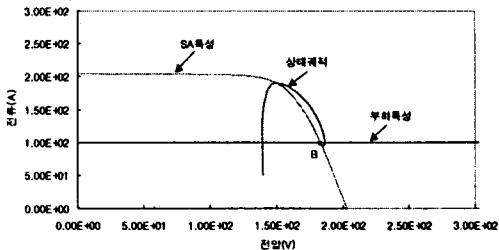


그림 8. 100A 전류원부하일 때 미소변동분( $\Delta V=24\%$ ,  $\Delta I=50\%$ )에 대한 상태궤적, [고유치( $-2.07 \times 10^{+04} \pm j 3.67 \times 10^{+01}$ )], 동작점( $V_C=185V$ ,  $I_L=100A$ )

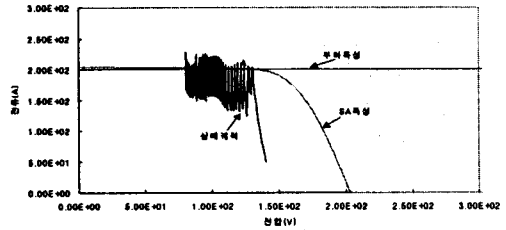


그림 9. 200A 전류원부하일 때 미소변동분( $\Delta V=4\%$ ,  $\Delta I=75\%$ )에 대한 상태궤적, [고유치( $-6.73 \times 10^{+03}$ ,  $-1.49 \times 10^{+06}$ )], 동작점( $V_C=135V$ ,  $I_L=200A$ )

## 5.2 자연전류 방식의 SPS

그림 10과 그림 11은 자연전류형 인버터를 사용하여, 20KW 용량의 부하를 SA에 연결하였을 때 미소 변동에 대한 시스템의 응답특성을 보여준다. DC 인터페이스의 인덕턴스 L은 1mH, 캐패시턴스 C는  $10\mu F$ 이다. 미소 변동이 A 점 근처에서 작게 발생하였을 때 시스템의 전압 및 전류의 상태궤적은 A점을 향한다. 그러나, 미소 변동이 크게 발생하면, 시스템의 전압 및 전류의 궤적은 B점을 향하여 진행하다가, B점은 불안정하므로 시스템은 붕괴된다. 이것은 강제전류형 인버터를 사용한 그림 4, 5의 경우와 상반된 결과를 나타낸다.

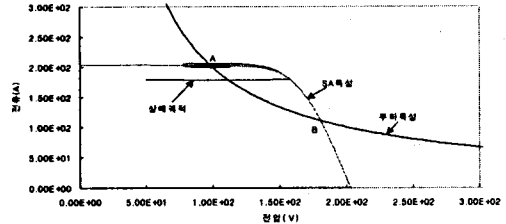


그림 10. 20KW 전력부하일 때 미소변동분( $\Delta V=49\%$ ,  $\Delta I=11\%$ )에 대한 상태궤적, [고유치( $-8.37 \times 10^{+02} \pm j 2.56 \times 10^{+01}$ )], 동작점( $V_C=98V$ ,  $I_L=203A$ )

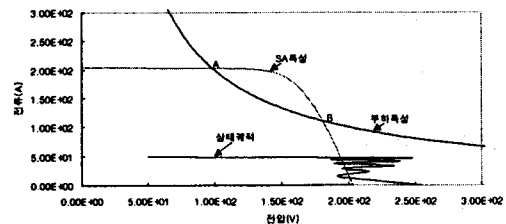


그림 11. 20KW 전력부하일 때 미소변동분( $\Delta V=72\%$ ,  $\Delta I=54\%$ )에 대한 상태궤적, [고유치( $1.54 \times 10^{+03}$ ,  $-9.24 \times 10^{+06}$ )], 동작점( $V_C=181V$ ,  $I_L=109A$ )

그림 12는 자연전류형 인버터의 제어모드에 의해 부하가  $0.1\Omega$ 의 저항으로 등가 처리될 때의 미소변동에 대한 시스템의 상태궤적을 보이며, 그림 13은  $3\Omega$ 의 저항부하로 등가 처리될 때이다.

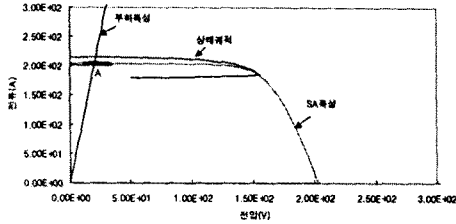


그림 12.  $0.1\Omega$  저항부하일 때 미소변동분( $\Delta V=59\%$ ,  $\Delta I=12\%$ )에 대한 상태궤적, [고유치( $-7.07 \times 10^{+02} \pm j 2.37 \times 10^{+01}$ ), 동작점( $V_C=20.5V$ ,  $I_L=205A$ )]

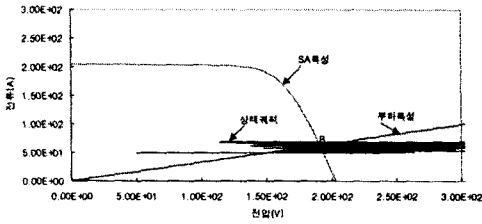


그림 13.  $3\Omega$  저항부하일 때 미소변동분( $\Delta V=74\%$ ,  $\Delta I=17\%$ )에 대한 상태궤적, [고유치( $3.07 \times 10^{+03}$ ,  $-1.38 \times 10^{+06}$ ), 동작점( $V_C=190.8V$ ,  $I_L=60.6A$ )]

그림 14는 부하가  $100V$ 의 전압원으로 등가 처리될 때의 미소변동에 대한 시스템의 상태궤적을 보이며, 그림 15는 부하가  $180V$ 의 전압원으로 등가 처리될 때이다.

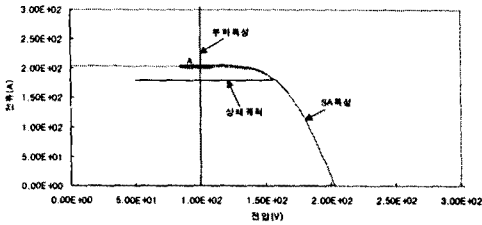


그림 14.  $100A$  전압원부하일 때 미소변동분( $\Delta V=50\%$ ,  $\Delta I=11\%$ )에 대한 상태궤적, [고유치( $-1.15 \times 10^{+03} \pm j 6.91 \times 10^{+01}$ ), 동작점( $V_C=100V$ ,  $I_L=203A$ )]

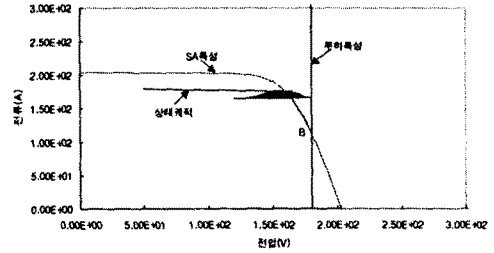


그림 15.  $180A$  전압원부하일 때 미소변동분( $\Delta V=72\%$ ,  $\Delta I=37\%$ )에 대한 상태궤적, [고유치( $-1.13 \times 10^{+02}$ ,  $-8.87 \times 10^{+05}$ ), 동작점( $V_C=180V$ ,  $I_L=113A$ )]

## 6. 결 론

본 논문은 전력계통에 연결된 SPS의 인버터 토폴로지 및 제어모드에 따른 안정도를 비교 해석하였다. 인버터는 강제전류형 인버터와 자연전류형 인버터를 비교하였고, 제어모드에 의한 부하특성을 8 가지로 분류하여 각각 경우에서의 안정도를 고유치 계산 및 상태공간 궤적을 이용하여 비교·분석하였다. 그 결과로 SPS는 전원원 영역에서는 자연 전류방식의 인버터를 사용하고, 전압원 영역에서는 강제 전류방식의 인버터를 사용하여 전력계통에 공급되는 출력전력이 안정되게 제어되었다. 따라서, SPS를 설치하기 전에 전체 전력시스템의 특성 해석을 수행하여 인버터 토폴로지 선정에 주의하여야, SPS의 효율적인 이용이 가능하다. 향후 시스템 개발에 이용하기 위해서는 실제통 데이터를 이용한 심도깊은 연구가 계속해서 수행되어야겠다.

## 7. 참고문헌

- [1] B. H. Cho, and J. R. Lee and F. C. Lee, "Large-Signal Stability Analysis of Spacecraft Power Processing Systems", IEEE Trans. on Power Electron., Vol.5, no.1, pp.110-115, Jan., 1990.
- [2] O. Wasynezuk, "Modeling and Dynamic Performance of A Line-Commutated Photovoltaic Inverter System", IEEE Trans. on Energy Conversion, Vol. 4, no. 3, pp.337-343, Sept., 1989.
- [3] O. Waxynezuk and N. A. Anwah, "Modeling and Dynamic Performance of A Self-Commutated Photovoltaic Inverter System", IEEE Trans on Energy Conversion, Vol.4, no. 3, pp. 322-328, Sept, 1989.