

# 대체 에너지용 계통선 연계형 인버터

안 호 균

(창원대학교 공과대학 전기공학과 조교수)

## 1. 서 론

부존 자원이 부족하여 에너지를 대부분 수입 화석 연료에 의존하고 있는 입장에서 우리나라가 지속적인 경제 성장을 위한 에너지 자원의 안정적 공급이라는 측면에서 볼 때 신재생 에너지와 같은 대체 에너지의 개발은 주요 과제가 되고 있다. 또한 탄산 가스 등의 지구 환경 문제 및 반원자력 운동이 펼쳐짐으로 해서 연료 전기 발전, 태양광 발전, 풍력 발전 및 신형 전지 전력 저장 시스템(Battery Energy Storage System : BESS)과 같은 분산형 신전원에 대한 재평가를 하여 적극적으로 전력 계통에 도입하고 보급시키려는 움직임이 고조되고 있다. 태양광 발전 시스템, 풍력 발전 시스템은 태양광 에너지, 풍력 에너지 등의 자연 에너지를 직접 전기로 변환을 하는 안전한 발전 방식이다. 한편 연료 전기 발전 시스템은 화석 연료에서의 수소와 공기중의 산소를 화학적으로 변환시켜 발전을 하는 방식이고 에너지 이용률을 높힘으로 해서 탄산 가스 등과 같은 배기 가스를 적게 하는 발전 방식이다. 또 신형 전지 전력 저장 시스템은 대용량의 축전지로 심야 전력을 전기화학적 반응으로 저장하고 피크 시간 때에 방출하는 부하 평준화 기능을 가지고 있는 시스템으로서 발전 설비의 이용률, 발전 효율의 향상 등으로 석유 대체 에너지를 효율적으로 이용할 목적으로 개발되고 있다.

이들의 신전원 시스템 대부분은 수kW~수백kW의 비교적 규모가 작은 전원으로 전력 소비지에 널리 분산을 한 분산형 전원 시스템 형태로 도입될 것으로 예상된다. 더우기 이러한 신전원의 출력은 직류인데 대해서 수용가측에서는 교류 부하가 많기 때문에 직류-교류 변환 장치(인버터)가 필요하게 된다. 이러한 대체 에너지용 인버터의 기본 성능은 직류 입력을 일정 주파수의 교류로 변환하여 정전압 출력을 얻는 것이다. 인버터에 요구되는 기본 성능으로서는 먼저 직류 전력을 유효하게 교류 전력으로 변환해야 하기 때문에 고효율이라야 하고, 다음에 소형, 저력, 보수가 용이하다는 등의 경제성이다.

또, 분산형 신전원의 직류 출력의 피크와 수요 전력 피크가 일치하지 않을 경우, 급격한 부하 증가 및 발전 불능과 같은 열악한 조건하에서도 지속적이고 안정된 전력 공급을 위해 직류 발생 전력을 저장하거나 또는 상용 전력 계통과 연계할 필요가 있다. 따라서 대체 에너지용 인버터는 상용 전력 계통과의 연계 유무에 따라서 독립형( Stand-Alone Type : SA ) 인버터와 연계형( Utility-Interactive Type : UI ) 인버터로 구분한다. 독립형은 직류 에너지원의 주변 환경에 따른 불확정성 때문에 축전지를 반드시 필요로 하며 연계형은 설비 효율의 향상과 출력 안정을 위해 축전지를 부가하는 것이 바람직하나 직류 에너지원으로부터의 발전 전력이 부족한 경우에는 기존의 상용 계통에서 전력을 공급받을 수 있기 때문에 반드시 축전지를 필요로 하지 않는다. 이 때 상용 전력 계통과 연계할 경우에는 다른 전력 수요가에 장애를 주지 않도록 배려하는 동시에 계통 주파수나 전압의 변동 및 고조파 일그러짐에 대응할 수 있는 운전 성능이 요구된다. 이들 전력의 질과 신뢰성 문제는 장래의 보급에 있어 아주 중요한 문제가 된다.

대체 에너지용 인버터는 입력 전원의 종류에 따라 전압원 인버터(Voltage Source Inverter : VSI)와 전류원 인버터(Current Source Inverter : CSI)로 구분한다. 전압원 인버터는 인버터 자체가 전압원이 되기 때문에 상용 계통과 연계하는 경우, 출력 변동분을 흡수하는 연계 리액터(coupling reactor)를 통해 접속하며, 따라서 무효 전력과 유효 전력을 조절하기 위해서 상용 계통 전압에 대해서 인버터 출력 전류의 진폭과 위상을 각각 제어한다. 따라서 전압원 인버터는 독립 운전이 필요한 절환형의 연계 운전에서 사용한다.

전류원 인버터는 출력 전류의 진폭과 위상을 직접 제어하기 때문에 상용 계통과의 연계시에도 연계 리액터를 접속할 필요가 없으며 전력 조류의 제어, 고조파의 억제가 용이하므로 전력 계통과의 상시 병렬 운전이 적합하다. 그러나 전류원 인버터는 독립 운전이 불가능하므로 독립 운전을 필요로 하는 개인 주택용 등의 소규모 분산형 시스템에는 부적합하다. 그러므로 중,소규모 분산형 시스템에 사용

할 연계형 인버터의 실용화를 위해서는 독립 운전과 연계 운전 모듈을 결합할 수 있도록 전압원 인버터 방식을 채택하고, 비싸고 정기적인 보수 점검을 필요로 하는 비효율적인 축전지는 소규모 개인 주택용으로는 부적합하므로 축전지가 없는 계통선 연계형 인버터가 필요로 하게 된다.

## 2. 계통선 연계형 인버터의 설계 및 제작

계통선 연계형 시스템이 개인 주택용과 같은 소규모 분산형 전원 시스템으로 실용화되기 위해서는 상용 전력 계통이 요구하는 운전 성능을 충분히 만족시켜 주어야 한다. 그림 1은 계통선 연계형 인버터의 전체 블럭선도로서 설계시 사용한 설계 기준 및 설계 근거는 표 1 과 같다. 또한 인버터의 출력전류와 부하전류의 상호관계에 따라 독립운전모드, 병렬운전모드, 연계 운전모드의 3가지 운전모드로 구분할 수 있다. 그림 2는 계통선 인버터 블럭도 이다.

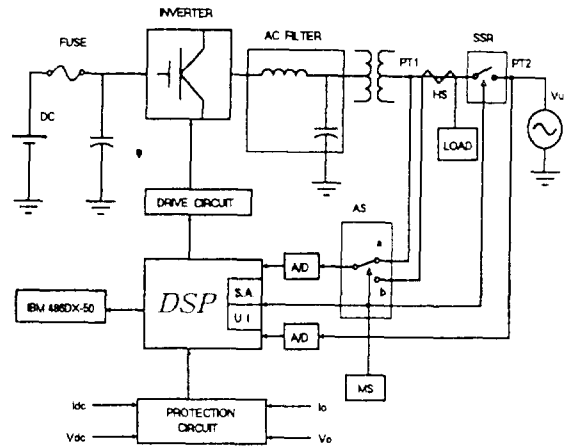


그림 1. 계통선 연계 인버터의 전체 블럭도

## 3. 디지털 제어 알고리즘

$$\dot{X}(t) = AX(t) + Bu(t)$$

(1)

$$X(t) = V_o(t)$$

### 3.1 시스템 모델

출력 전압  $V_o$ 를 상태 변수 벡터  $[V_o \ V_o]^T$ 로 하여 2차 시스템으로 모델링하면 상태 방정식은 다음 식과 같다.

여기서,

$$\begin{aligned} X(t) &= \text{상태 변수} \\ u(t) &= \text{제어 변수} \end{aligned}$$

표 1. 운전 모드별 설계기준

	제 어 기 능	설 계 사 항
독립 운전 (Stand-alone mode)	$\begin{aligned} & \cdot I_1 = I_L \\ & \cdot \varphi_{V_0} = \varphi_{V_c} \end{aligned}$	1. Low THD 2. 연계 운전 대비하여 인버터 출력전압 ( $V_o$ )와 계통선 전압( $V_c$ )의 위상 동기화 3. 기준전압 추종 제어(순시전압 제어)
병렬 운전 (Parallel-operation mode)	$\begin{aligned} & \cdot I_1 < I_L \\ & \cdot I_L = I_1 + I_c \\ & \cdot \varphi_{I_1} = \varphi_{I_L} \end{aligned}$	1. Low THD 2. 순환전류 방지 및 전류분담 제어를 위해 인버터 출력 전류와 부하전류와의 위상 동기화. 3. 독립운전 및 병렬 운전 겸용
연계 운전 (Utility-interactive mode)	$\begin{aligned} & \cdot I_1 > I_L \\ & \cdot I_1 = I_L + I_c \\ & \cdot \varphi_{I_1} = \varphi_{V_c} \end{aligned}$	1. Low THD 2. 순시적인 과도응답 특성 (출력 전류의 순시제어) 3. 인버터 출력전류( $I_1$ )중 부하( $I_L$ )에 공급하고 남은 잉여 전류( $I_c$ )를 계통선측으로 역률 1로 역조류시키기 위해 ( $I_c$ )의 위상과 계통선 전압 ( $V_c$ )의 위상 동기화. 4. 독립 운전 및 연계운전 겸용

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ \frac{-1}{L_s C_p} & \frac{-1}{R_o C_p} \end{bmatrix}, B = \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{1}{L_s C_p} \end{bmatrix}$$

이 때 인버터 전압  $V_{in}$ 은  $+E, 0, -E$ 의 3가지 값을 갖는다.

다음에, sampled data 시스템에 대한 상태 방정식을 구하기 위해서 그림.2 와 같이 인버터 전압  $V_{in}$ 이 샘플링 구간  $T$ 내에 존재하는 PWM 펄스가 되도록 하며, 60Hz 기준 정현파의 한 주기를 샘플링 주기  $T$ 로  $N$ 등분한다. 따라서 인버터 전압  $V_{in}$ (필터 입력 전압)이 그림.2 와 같이 샘플링 구간  $T$ 의 중앙에 위치하며 펄스 크기가  $+E, 0$  또는  $-E$ 가 되도록 스위칭 소자는 매 샘플링 주기마다 온-오프 된다. 그러므로  $T \ll 2\pi\gamma LC$  일 경우,  $kT \leq t \leq (k+1)T$  구간 동안 인버터 전압  $V_o(t)$ 를  $V_o(kT)$ 라고 가정하면 식(1)로부터 sampled data 상태 방정식 식(3)을 유도할 수 있다.

$$X(k+1) = e^{AT} X(k) + \int_{kT}^{(k+1)T} e^{A(T-w)} dw B U_i(k) \quad (2)$$

$$X(k+1) = e^{AT} X(k) + e^{AT/2} B E \Delta T(k) \quad (3)$$

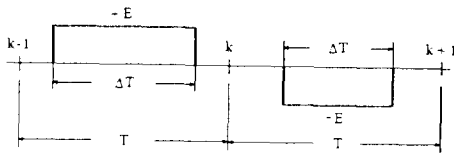


그림 2. PWM 펄스 패턴

### 3.2 순시 전압 제어 알고리즘 (기준전압 추종제어)

인버터 출력 전압 제어의 기본 개념은 샘플링 시점  $t = kT$ 에서 측정된 출력 전압  $V_o(k)$ 와 시스템의 관계식을 이용하여 다음 샘플링 시점  $t = (k+1)T$ 에서 인버터 출력 전압  $V_o(k+1)$ 이 기준 전압  $V_{ref}(k+1)$ 에 일치하도록 제어 입력  $U_i(k+1)$ 의 펄스폭  $\Delta T$ 를 계산하여 출력하는 것으로서 제어 알고리즘은 다음과 같이 유도된다. 식 (3)을 z-변환하면 출력 전압  $V_o(z)$ 는

$$V_o(z) = \frac{g_1 z + (g_2 \varphi_{12} - g_1 \varphi_{22})}{z^2 - (\varphi_{11} + \varphi_{22})z + \varphi_{11} \varphi_{22} - \varphi_{21} \varphi_{12}} \quad (4)$$

로 주어진다. 따라서 다음 방정식을 얻을 수 있다.

$$V_o(k) + a_1 V_o(k-1) + a_2 V_o(k-2) = b_1 \Delta T(k-1) + b_2 \Delta T(k-2) \quad (5)$$

여기서,  $a_1 = -(\varphi_{11} + \varphi_{22})$

$$a_2 = \varphi_{11} \varphi_{22} - \varphi_{21} \varphi_{12}$$

$$b_1 = g_1$$

$$b_2 = g_2 \varphi_{12} - g_1 \varphi_{22}$$

식 (5)에서  $k$ 를 증가시키고, 다음 구간에서의 출력 전압  $V_o$ 를 그 구간에서의 기준 전압  $V_{ref}$ 로, 즉  $V_o(k+1) = V_{ref}(k+1)$ 로 대치하여 정리하면 제어 입력  $U_i(k+1)$ 의 펄스폭  $\Delta T$ 는

$$\Delta T(k) = \frac{1}{b_1} V_{ref}(k+1) + \frac{a_1}{b_1} V_o(k) + \frac{a_2}{b_1} V_o(k-1) - \frac{b_2}{b_1} \Delta T(k-1) \quad (6)$$

이 된다. 그러므로 샘플링 구간  $k$ 에서 측정된 출력 전압  $V_o(k)$ 와 다음 구간  $k+1$ 에서의 기준 전압  $V_{ref}(k+1)$ , 과거에 측정된 출력 전압  $V_o(k-1)$ 과 펄스폭  $\Delta T(k-1)$ 로부터 구간  $(k+1)$ 의 제어 입력  $U_i(k+1)$ 의 펄스폭  $\Delta T(k)$ 를 미리 구할 수 있음을 알 수 있다.

### 3.3 순시전류 제어 알고리즘(역률 1제어)

인버터는 모든 부하 전류를 공급하고, 남은 잉여 전류 (surplus current)는 역률 1로 계통측으로 보내진다. 마이크로 프로세서는 출력 전류가 매 샘플링 순간에 정현파 기준 전류( $I_{ref}$ )에 일치하도록 브리지 인버터의 스위치를 제어하며, 인버터 출력 전류  $I_o$ 가 상태 변수로 제한되어 필요한 제어 입력의 펄스폭이 계산되어진다.

연계 운전시 역률 1 제어를 위해 전력 계통측으로 잉여 전류  $I_u$ 의 위상과 계통선 전압  $V_u$ 의 위상을 일치 시켜야한다. 전류제어시의 상태변수는  $X = [ I_o \quad I_o ]^T$ 이다.

$$\dot{X}(t) = AX(t) + Bu(t) \quad (7)$$

$$X(t) = I_o(t)$$

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ \frac{-1}{L_s C_p} & \frac{-1}{Z_o C_p} \end{bmatrix}, B = \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{1}{Z_o L_s C_p} \end{bmatrix}$$

$\Delta T(k)$ 는 다음 식과 같다.

$$\Delta T(k) = \frac{1}{b_1} I_{ref}(k+1) + \frac{a_1}{b_1} I_o(k) + \frac{a_2}{b_1} I_o(k-1) - \frac{b_2}{b_1} \Delta T(k-1) \quad (8)$$

그러나 식 (8)에서 샘플링 구간의 기준 전류  $I_{ref}(k+1)$ 을 직접 구할 수 없으므로 2차 예측기법(second order

prediction method)을 사용하면

$$I_u(k) = B V_u(k) \quad (9)$$

$$I_{ref}(k+1) = 3(I_u(k) - I_u(k-1)) + I_u(k-2) \quad (10)$$

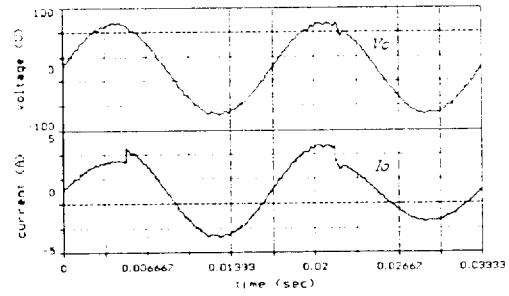
이 된다.

#### 4. 시뮬레이션 및 실험

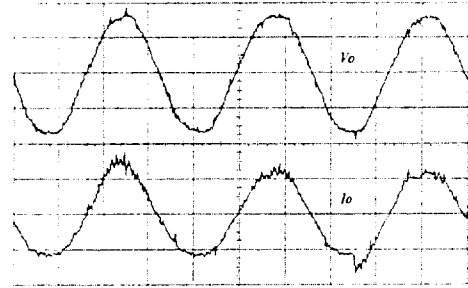
그림 3-4는 순시전압제어기의 과도응답 특성을 확인하기 위한 시뮬레이션 및 실험 결과 파형으로서 그림 3은 기준 전압이 변화할때 인버터 출력이 2-3 샘플링 주기안에 변화된 기준전압에 순시적으로 추종제어 됨을 알 수 있다. 그림 4는 부하 변화시의 출력전압 및 전류파형을 나타내며 부하가 변동되는 순간에 2-3 샘플링 주기내에 전압변동없이 순시적이고도 안정적으로 전류가 변화함을 알수있다.

그림 5는 연계운전시의 인버터 기준 전류 변화시의 출력전류의 과도응답을 나타내고 있다. 인버터 출력전류  $I_o$ 는 부하전류  $I_L$ (일정)과 계통선측으로서 잉여전류  $I_u$ 의 합 ( $I_o = I_L + I_u$ )임을 알 수 있으며 기준전류를 변화시키면 계통선측으로의 역조류량( $I_u$ )을 조절할 수 있다.(전류 분담제어)

그림 6은 인버터 출력전류가 부하전류보다 적을 경우, 그

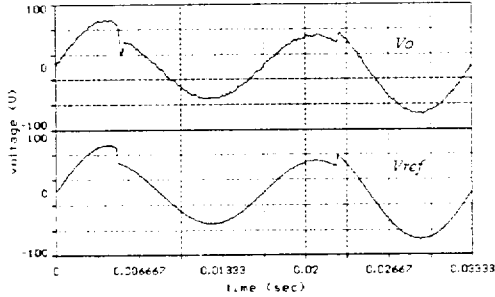


(a) 시뮬레이션

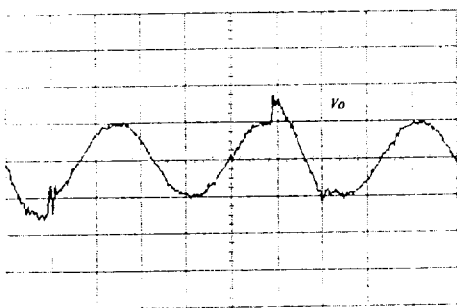


(b) 실험

그림 4. 부하 변화 (독립운전)

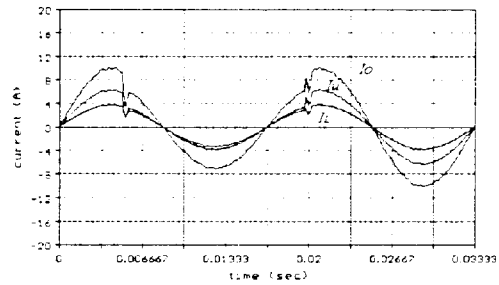


(a)시뮬레이션

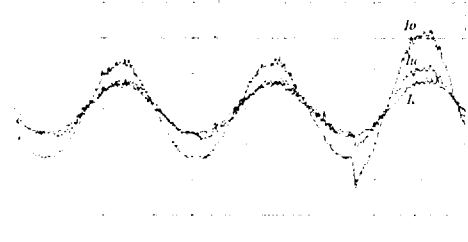


(b) 실험

그림 3. 기준전압 변화 (독립운전)

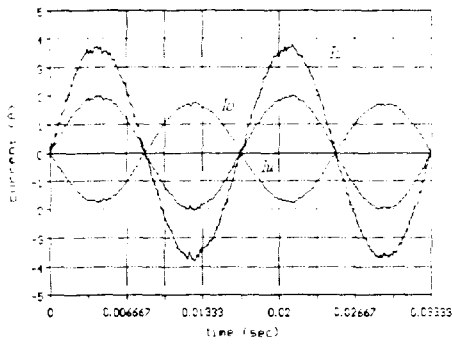


(a) 시뮬레이션

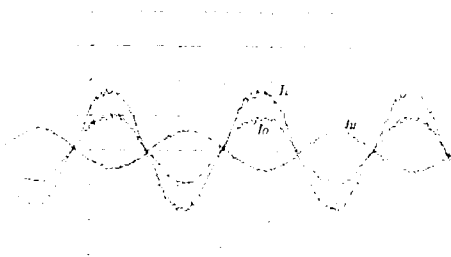


(b) 실험

그림 5. 연계운전 ( $I_o = I_L + I_u$ )



(a) 시뮬레이션



(b) 실험

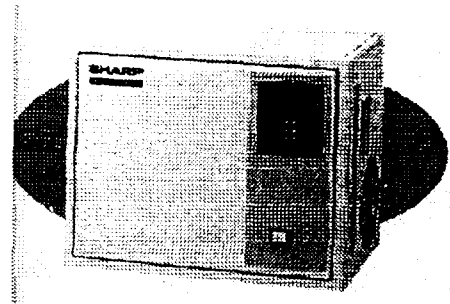
그림 6. 병렬운전 ( $I_L = I_o + I_u$ )

부족분을 상용계통측으로 부터 공급받는 병렬운전임을 알 수 있으며 전체적으로 시뮬레이션과 실험결과가 잘 일치함을 알 수 있다.

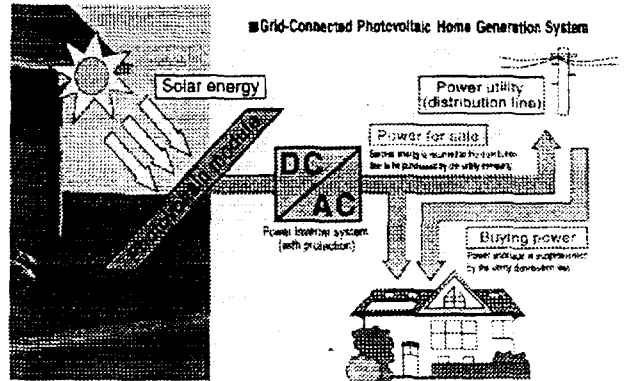
### 5. 연구동향 및 제품현황

국내의 연구동향을 살펴보면, 청정에너지 사업이 장기적으로 전망이 밝고, 정부가 최근들어 태양광 발전 시스템의 설치를 확대키로 하는등 민자유치형식의 대체에너지 개발 실용화 사업을 장려 하는데 힘입어 LG산전, 삼성전자, 현대전자 등 산전 대기업들은 최근들어 태양광 발전 시스템, 조력 발전 시스템, 풍력 발전 시스템등 대체에너지 실용화 사업을 적극 추진하고 있다. 예로서, 충남 대천군 호도의 1백 kw급 태양광 발전소, 낙도및 산간벽지의 태양전원 시스템 공급, 무인등대, 교통신호 등 독립운전용 소규모 발전 시스템 공급에 주력하고 있으나 계통선 연계형 인버터에 대한 개발은 아직 전무한 상태다.

반면 일본의 경우, Toshiba, Sharp, Sanyo, 일본 전지등에서 많은 대체에너지 시스템중, 특히 태양광 발전을 이용한 소규모 주택용 연계형 인버터 (독립운전+ 연계운전)를 생산하고 있다. 그림 7-8은 각각 일본 Sharp사와 Sanyo사의 연계형 인버터에 대한 사양 및 제품을 보여주고 있다.



(a) 가정용 연계형 인버터(Sharp)



(b) 가정용 연계형 인버터의 계통선과의 연계

<Specifications>

• System configuration equipment chart (numbers required for an individual system)

System name	UH18	UH25	UH31	UH37	UH45	UH48
Solar cell capacity (KW)	1.8x	2.48	3.08	3.87	4.28	4.90
Solar cell modules (no. of panels)	12	16	20	24	28	32
Array system (with cabling)	1 each					
Inverter	1 unit (UH300)			1 unit (UH450)		
Junction box	1 unit (S230C)			1 unit (S235C)		
1/4hr meter (meter housing included)	1 unit (S230S, S2120S)					
AC-side connector (optional)	1 unit (S230K, S250K, S270K)					

• Inverter specifications

Model	JH20	JH50
Inverter rated power	3 KW	5 KW
Inverter system	Voltage-type current control system (sinusoidal PWM system)	
Rated input voltage	180 VDC	
Operating voltage of solar modules used	140 to 220 VDC	
Power conversion efficiency	greater than 90% (at rated output)	
Insulation system	high-frequency insulation system	
Output electrical system	200 V, single phase, two-wire system	
Input power control system	Solar-cell maximum power point tracking control system	
Inverter protection features	DC overvoltage, AC overvoltage, power supply anomaly, temperature anomaly, frequency anomaly	
Interconnect protection features	Utility power undervoltage, utility power overvoltage, utility line frequency understoot, utility line frequency overshoot	
Weight	15 kg (33 lbs)	24 kg (53 lbs)
External dimensions	230 x 230 x 215 mm (0.920 m)	430 x 330 x 215 (5.027 m)
	12" x 11" x 8.5"	17" x 13" x 8.5"

(c) 제품의 용량 및 특징

그림 7. 연계형 인버터 (Sharp 사)

Specifications

Rated output capacity	3 kW
Input voltage range	DC 140 ~ 300V
Interconnection point	AC 202/101V
Conversion efficiency	≥ 90% (with rated output)
Conversion method	Voltage source current control method
Switching method	PWM method
Input power control	Maximum power point tracking
Interconnection protection functions	Over voltage relay, Under voltage relay Over frequency relay, Under frequency relay
Anti-islanding protection	Active method : Frequency bias Passive method: Detect the 3rd harmonic component
Dimension, Weight	Inverter : 400W × 200D × 300H(mm) 16(kg) Transformer : 260W × 180D × 300H(mm) 32(kg)

그림 8. 연계형 인버터(Sanyo, 3kw)

참 고 문 헌

[1] 안호균 외 2명 “계통선 연계형 인버터의 설계 및 시 제작에 관한 연구” 전기 학회 논문집 42권 1호, 1993. 1.  
 [2] 안호균 “대체에너지용 인버터 시스템과 상용 전력계 통과의 병렬운전에 관한 연구” 한전 보고서 1994. 7. 14.  
 [3] 김경화 “분산형 전원의 계통 연계기술” 전기설비, 1988. 2.  
 [4] “광발전”, “태양광 발전의 개발 현황과 전망”, 전기 설 비, 1988. 2.

[5] “단독 계통으로서 운전하는 자가 발전”, 월간전기, pp.47-53 Oct., 1990.  
 [6] “자가 발전의 계통 연계”, 월간 전기, pp. 39-46, Oct., 1990  
 [7] F. Harashma, H. Inaba, N. Takashima, Microprocessor Controlled SIT Inverter for Solar Energy System”, IECON'85, pp.643-648, 1985  
 [8] R. L. Steigerwald, A. Ferraro, F. G. Turnbull, "Application of Power Transistor to Residential and Intermediate Rating Photovoltaic Array Power Conditioners". IEEE, PESC, pp. 254-267, 1983  
 [9] K. P. Gokhale, A. Kawamura and R. G. Hoft, "Deadbeat Microprocessor Control of PWM Inverter for Sinusoidal Output Waveform Synthesis: IEEE, PESC, pp.28-36, 1985  
 [10] P. Maussion, M. Grandpierre, J. Faucher, J. C. Hapiot, "Instantaneous Feedback Control of Single-Phase PWM Inverter with Nonlinear Loads by sine Wave Tracking", IEEE, Transaction IAS, pp.130-135, 1989

저 자 소 개



안호균(安鎬均)

1958년 8월 14일생. 1981년 2월 고려대 공대 전기공학과 졸업. 1989년 8월 고려대 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1992년 8월 고려대 대학원 전기공학과 졸업(공학박). 1992년 9월-현재 창원대 공대 전기공학과 조교수.