

## PWM 컨버터를 이용한 계통연계 에너지시스템에 관한 연구

김 길동<sup>1)</sup>, 이 한민<sup>2)</sup>, 홍 용기<sup>3)</sup>, 김 대균<sup>4)</sup>

### A Study on Utility Interactive Energy System using PWM Converter

GilDong Kim, HanMin Lee, YongKi Hong, DeaGyun Kim

**Key words** : PWM converter(PWM 컨버터), Digital PLL circuit(디지털 PLL 회로), Feedforward control (피드 포워드 제어)

**Abstract** : Since the residential load is an AC load and the output of solar cell is a DC power, the photovoltaic system needs the DC/AC converter to utilize solar cell. In case of driving to interact with utility line, in order to operate at unity power factor, converter must provide the sinusoidal wave current and voltage with same phase of utility line. Since output of solar cell is greatly fluctuated by insolation, it is necessary that the operation of solar cell output in the range of the vicinity of maximum power point. In this paper, DC/AC converter is three phase PWM converter with smoothing reactor. And then, feedforward control used to obtain a superior characteristic for current control and digital PLL circuit used to detect the phase of utility line.

### 1. 서론

본 논문에서는 PWM 컨버터를 이용하여 태양광발전 시스템을 구성하였다. PWM 컨버터를 이용한 시스템의 구성은 절연변압기를 사용한 방식에 비해 시스템의 소형화를 위해서 직렬 리액터를 사용하여 계통전원과 연계하였다. 또한, 본 시스템은 급격한 수요 증가에 의해 발생하는 첩두부하에 의한 전력부족현상을 해소할 수 있도록 태양광발전 시스템으로부터 발생된 출력을 부하에 공급할 수 있도록 하였고, 잉여전력분 발생시 계통에 공급하여 상용계통과의 단위역률 연계운전이 가능하도록 디지털 PLL(phase locked loop)회로를 구성하여 계통전압과 태양광발전 시스템의 위상을 동기화 시켰다. 그리고 빠른 전류응답을 얻기 위하여 피드포워드(feed-forward)제어기를 적용하였으며, 승압효과를 이용하여 일사량 변동에 따른 태양전지의 출력을 항상 최대로 하였다. 이러한 동작특성을 Matlab Simulink를 이용한 시뮬레이션을 통하여 검토하고, 실험을 통하여 확인하였다.

### 2. 계통연계형 태양광발전 시스템

#### 2.1 전체 제어 시스템

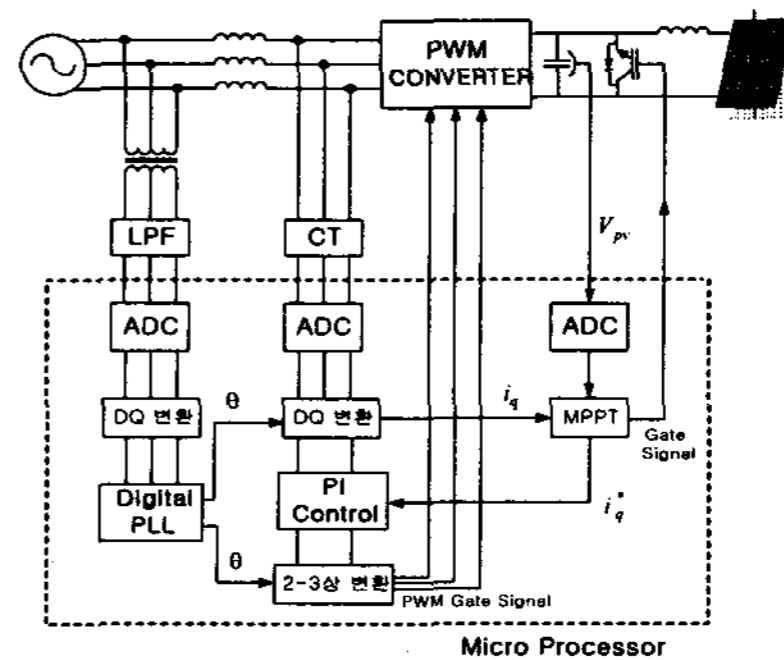


그림 1 시스템 블록도

그림 1은 PWM 컨버터를 이용한 계통연계형 태양

- 1) 한국철도기술연구원  
E-mail : gdkim@krri.re.kr  
Tel : (031)460-5710 Fax : (031)460-5749
- 2) 한국철도기술연구원  
E-mail : hanmin@krri.re.kr  
Tel : (031)460-5423 Fax : (031)460-5749
- 3) 한국철도기술연구원  
E-mail : ykhong@krri.re.kr  
Tel : (031)460-5501 Fax : (031)460-5749
- 4) 저자3의 소속  
E-mail : 경기직업훈련원  
Tel : (031)943-3734 Fax : (031)943-3732

광발전 시스템의 시스템 블록도를 나타내고 있다. 전체 시스템의 구성은 PWM 컨버터, PV 어레이와 승압초퍼, 직렬 리액터, 계통전원, 그리고 마이크로프로세서로 구성되어 있다.

그림 2은 본 논문에 적용한 시스템 제어블록도이다. 전체적인 제어방식은 전류 벡터제어를 수행하였다. 계통전원의 위상을 디지털 PLL회로를 이용하여 추정하고, 추정된 위상을 기준으로 좌표변환을 수행하여, 단위역률 연계운전을 위한 계통전압과 태양광발전 시스템의 위상을 동기화 시켰다. 승압초퍼는 태양전지의 최대출력점 제어를 수행하며, 컨버터의 q축 전류지령값은 태양전지의 최대출력점을 추종하는 시점에서의 전류값이 된다. 또한 컨버터의 계통연계시 발생할 수 있는 DC 오프셋 전류를 보상하기 위해 오프셋 전류제어기가 구성되어 있다.

- ① PWM 컨버터(PWM Converter) : 태양전지의 직류출력을 교류전력으로 변환하여 계통과 부하에 공급한다.
- ② 직렬리액터(Series Input Reactor) : 계통전원과 태양광발전시스템의 결합을 위해서 사용하였다.
- ③ 태양전지(PV Array) : 태양의 빛 에너지가 직접 전기에너지로 변환된 직류전원이다.
- ④ 최대출력점 추적제어(MPPT Control) : 승압초퍼를 이용하여 태양전지의 출력전압을 승압하여 PWM 컨버터의 DC입력으로 사용하고 또한 이때, 승압초퍼는 태양전지가 일사량, 온도등의 기후조건의 변화에 관계없이 항상 최대출력점을 추적 제어하도록 한다.<sup>[7]</sup>

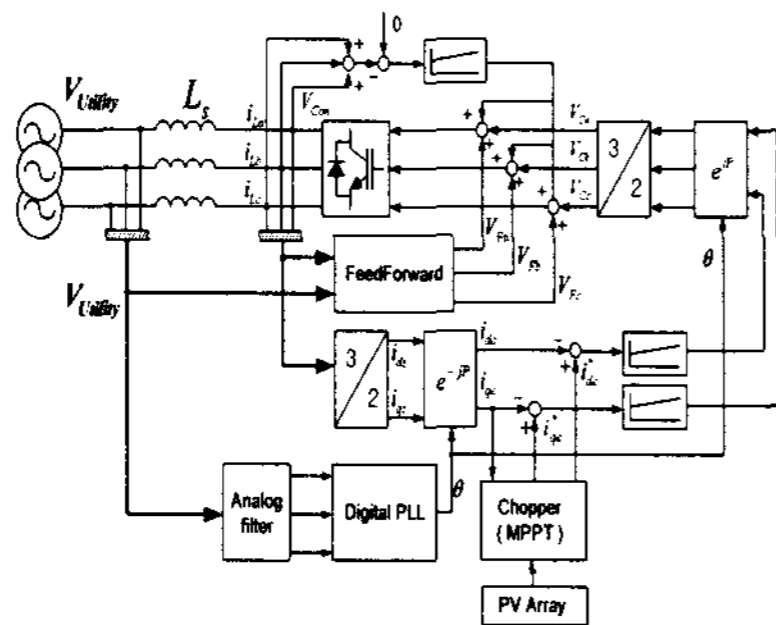


그림 2 제어 블록도

- ⑤ 전력계통(Utility) : 태양전지의 출력이 부하에서 요구하는 전력보다 큰 경우에는 전력계통에 잉여전력을 공급하고, 태양전지의 출력이 부하에서 요구하는 전력보다 작은 경우에는 부족한 전력을 전력계통으로부터 공급받는다.

### 2.3 Feed-forward 제어기

그림 3는 시스템의 전류 속응제어를 위한 피드포워드 제어회로를 나타내고 있다. 피드포워드 제어회

로가 추가된 전류제어블록의 구성은 PWM 컨버터 시스템에 있는 PI 전류제어기의 전달함수  $G_c(s)$ 와 직렬 리액터, PWM 컨버터의 출력전압 변화에 따라 보상되는 전류 피드포워드항으로 이루어져 있다. 이러한 제어블록에서 전류지령에 대한 부하 전류응답, 즉 전체전달함수를 구하면 식 (1)과 같다.

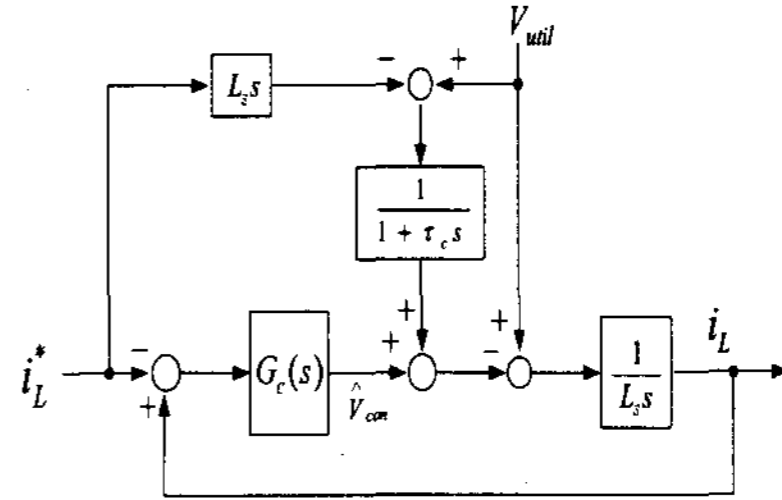


그림 3 피드포워드 제어블록도

여기에서,  $G_c(s)$ 는 컨버터의 PI 전류제어기,  $i_L$ 은 계통 주입전류,  $\tau_c$ 는 피드포워드 블록의 필터 시정수이다. 피드포워드 블록의 필터 시정수  $\tau_c$ 를 '0' 이라 한다면, 위의 시스템은 이상적인 전류제어 루프를 구성할 수 있다.

$$\frac{i_L}{i_L^*} = \frac{\frac{1}{1 + \tau_c s} + \frac{1}{L_s s} G_c(s)}{1 + \frac{1}{L_s s} G_c(s)} \quad (1)$$

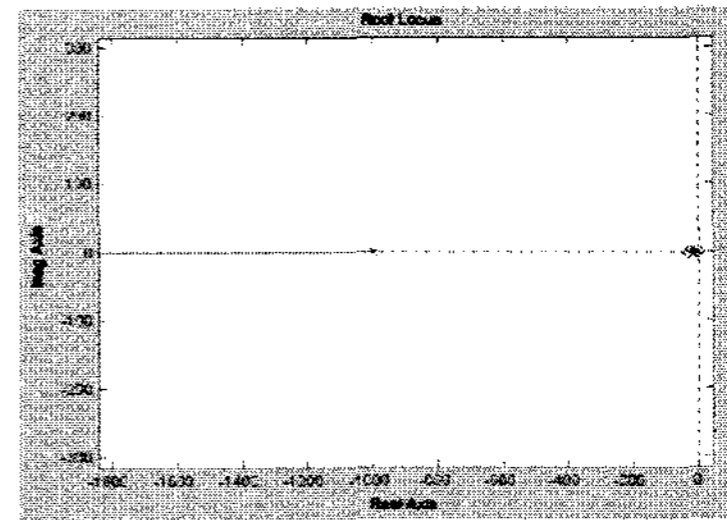


그림 4 = 0.001 인 경우의 우세극점

그러나 실제 시스템에서는 미분된 전류 값을 그대로 이용할 수 없기 때문에, 본 논문에서는 필터의 시정수  $\tau_c$ 를 '0.001'로 설정하였다. 이러한 경우 필터에 의한 시스템의 지연과 반응을 근래적도를 통하여 살펴보았다.

그림 4는 시스템에 영향을 줄 수 있는 피드포워드 제어기의 우세극점을 나타내었다. 그림에서 볼 수 있듯이, 우세극점은 -1000 정도로 안정적인 빠른 응답을 기대할 수 있다. 따라서 본 연구에서 구현하고자 하는 태양광발전 시스템의 전류제어에 적합함을 확인할 수 있다.

## 2.4 디지털 PLL 회로

그림 5는 3상 디지털 PLL의 구조를 나타내고 있다. 계통연계형 태양광발전 시스템은 계통전압의 주파수가 변화하더라도 원활한 동작을 수행할 수 있어야 한다. 계통전압의 위상각은 계통연계 시스템에 있어 가장 기본적인 중요한 정보이며 계통연계 시스템에서 정확하고 빠른 계통전압의 위상각 검출은 정확한 레퍼런스의 생성을 위해 필요하다.

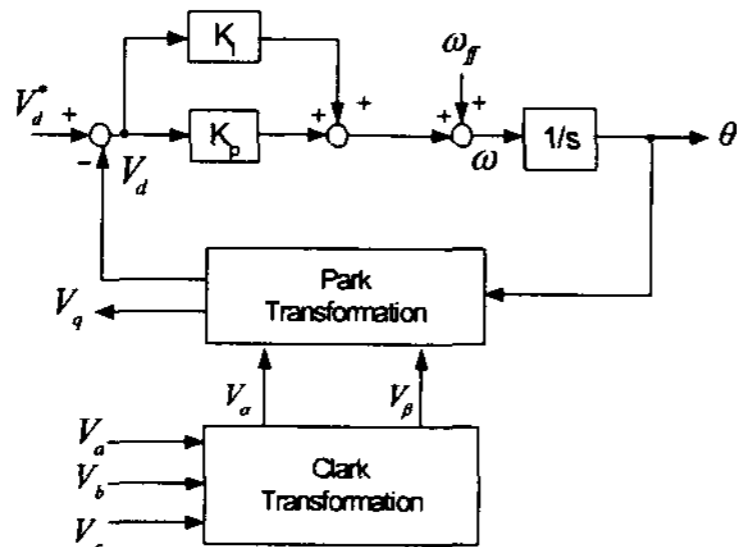


그림 5 3상 디지털 PLL 구조

계통전압의 위상각 검출을 통한 시스템의 구성을 위해 디지털 PLL 회로를 구성하여 기준되는 위상을 검출하여 위상을 동기화 시켜 정확한 전류제어를 수행한다.

## 3. 실험결과

본 논문에서 실험에 사용된 시스템은 정격 600[V], 50[A]의 IGBT를 이용하였고, PWM 컨버터의 직렬 리액터는 시스템 출력으로부터의 전류 리플을 줄이기 위해서 일반적으로 많이 사용되는 리액터보다 큰 5[mH]의 리액터를 사용하였다. 이에 의해 늦어지는 시스템의 전류응답특성은 피드포워드 전류제어를 적용하여 보완하도록 하였다.

실험에 사용된 PWM컨버터를 이용한 최대 출력점 추적 제어기의 전체적인 구조는 그림 2과 같다. d축 전류는 계통 전압과의 위상을 제어하며 q축 전류는 최대 출력점을 제어하도록 구성되어 있다.

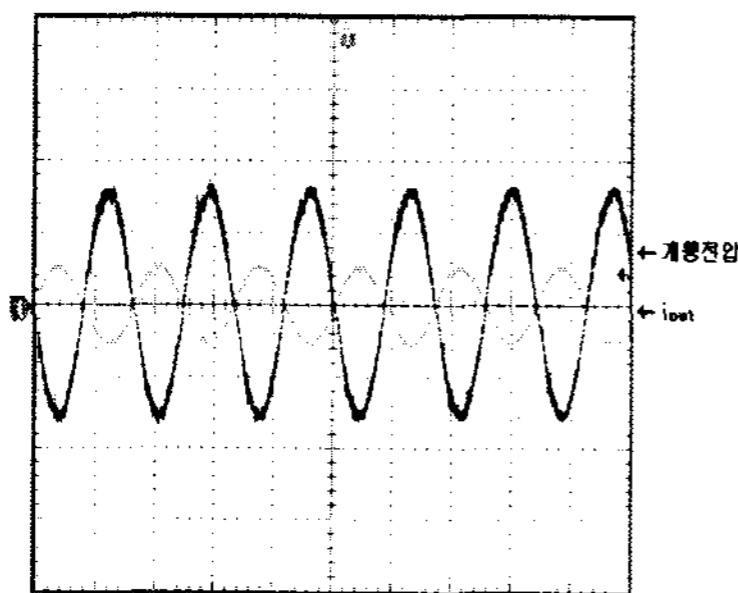


그림 6 계통전압과 컨버터 출력전류 파형  
(CH1: 200[V/div], CH4: 5[A/div], TD: 10[ms/div])

그림 6은 본 논문에서 제시한 시스템의 제어특성을 알아보기 위해서, 계통전압과 제시된 시스템의 출력전류를 나타내고 있다. 그림으로부터 계통전압과 출력전류의 위상이 거의 일치함을 알 수 있고, 이를 통해 태양광발전 시스템은 태양전지로부터 발생된 에너지를 단위역률로 계통전원측에 공급하고 있음을 확인할 수 있다.

그림 7은 PWM 컨버터 출력전류의 d-q 변환 파형을 나타내고, 그림 14의 d축전류와 q축전류를 X, Y 축으로 하여 벡터궤적을 얻은 결과 그림 15와 같은 결과를 얻었다. 그림 8로부터 출력전류는 외란 성분은 없으나 완전한 3상 평형전류가 흐르지 못하는 것을 알 수 있다.

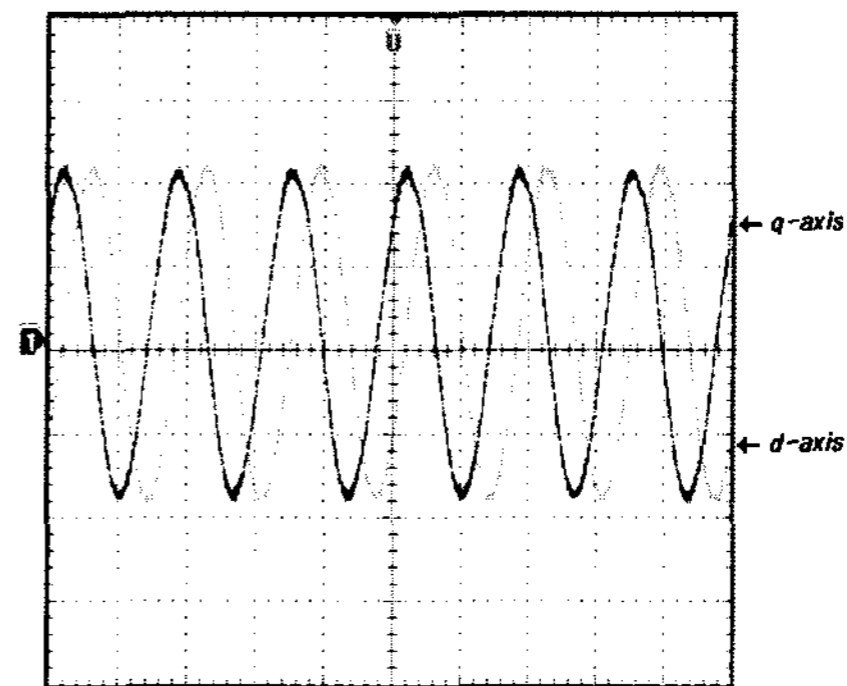


그림 7 d-q 변환된 출력전류의 D/A 컨버터 출력  
(CH1: 1[V/div], CH2: 1[V/div], TD: 10[ms/div])

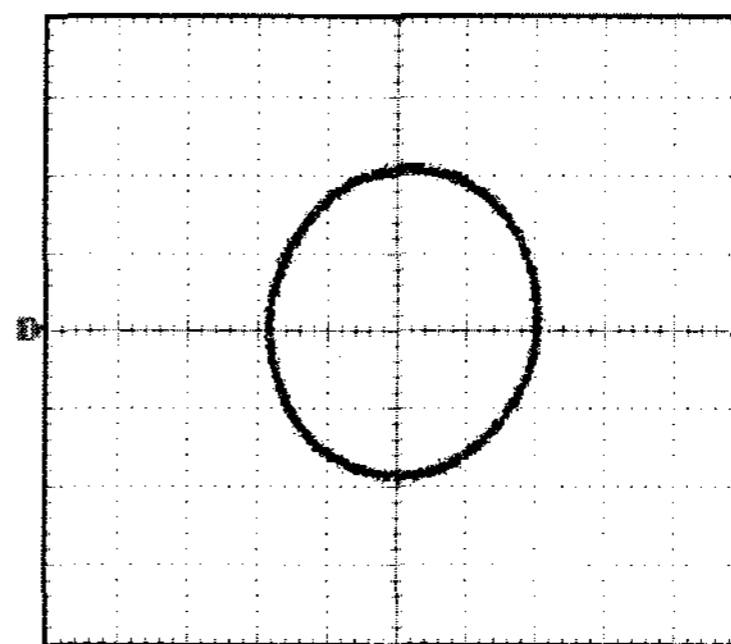


그림 8 d-q 변환된 출력전류의 벡터궤적  
(CH1: 1[V/div], TD: 10[ms/div])

이는 PWM 컨버터의 직렬 리액터의 값이 같지 않고 계통전압의 상전압 크기가 절대적으로 평형하지 않기 때문이다. 그러나, 이러한 정도의 불평형은 계통에 영향을 주지 않을 것으로 판단된다.

그림 9는 전류제어에 의한 q축 지령전압에 대한 q축 전류파형과 a상 전류 파형을 나타낸다. 그림에서와 같이 전류가 빠르게 추정함을 확인할 수 있다.

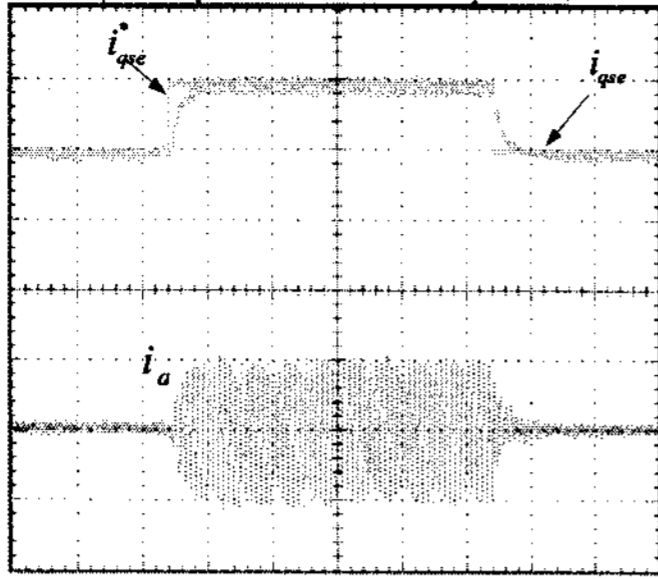


그림 9 q축전류와 상전류의 파형  
(CH1: 5[A/div], CH2: 5[A/div], TD: 10[ms/div])

그림 10은 같은 조건에서 시스템으로부터 계통으로 유입되는 전류의 고조파 성분을 분석하였다. 그림에서 알 수 있듯이 기본파 전류 성분이 외에 다른 고조파 성분은 없다. 따라서, 태양광 발전된 전력은 양질의 품질로 계통에 공급하고 있음을 알 수 있다.

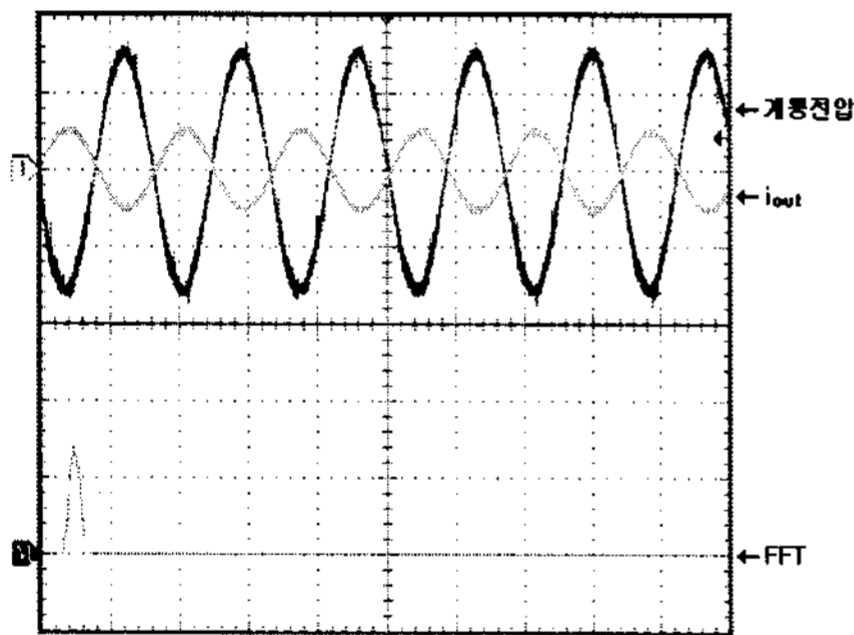


그림 10 컨버터 출력전류의 FFT 분석  
(CH1: 200[V/div], CH2: 5[V/div], TD: 10[ms/div])  
(Math - 2[A/div], 125[Hz/div])

## 4. 결론

본 논문에서는 계통연계형 태양광발전 시스템을 PWM 컨버터로 구성하여 상용계통과 연계운전함으로써 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- [1] 시스템의 안정성을 향상시키기 위하여 디지털 PLL 회로를 구성하여 계통전압과 태양광발전 시스템의 위상을 동기화 시켜 단위역률 연계운전이 가능함을 확인하였다.
- [2] 컨버터 출력전류의 속응제어를 위하여 피드포워드 제어를 적용한 결과 동작특성이 원활히 수행됨을 확인하였다.
- [3] 태양전지의 출력은 승압효과를 이용하여 일사량 변동에 대해 항상 최대출력이 유지되도록 MPPT제어를 하였다.

## References

- [1] E. Koutroulis, K. Kalaitzakis, and N.C. Voulgaris, 2001.1. "Development of a microcontroller-based, photovoltaic maximum power point tracking control system", IEEE Trans. Power Electronics., vol. 16, pp.46-54,
- [2] Chihchiang Hua and Chihming Shen, 1998. "Study of maximum power tracking techniques and control of DC/DC converters for photovoltaic power system", IEEE-PESC Conf. Rec., vol. 1, pp.86-93
- [3] S.Nonaka, K.Kesamaru, K.Yamasaki & M. Nishi, 1990. 10. "Interconnection System with Single Phase IGBT PWM CSI between Photovoltaic Arrays and The Utility Line", conf. Rec. of IEEE/IAS Annual Meeting, Seattle Washington, p.1302,