

# 증분컨덕턴스 MPPT제어 기반 계통연계형 태양광발전시스템의 전력품질 평가

論 文
56-1-2

## Assessment on Power Quality of Grid-Connected PV System Based on Incremental Conductance MPPT Control

薛在雄\* · 章在正\* · 金東珉\* · 李丞熾\*\* · 金鎮吾<sup>†</sup>  
(Jae-Woong Seol · Jae-Jung Jang · Dong-Min Kim · Seung-Hyuk Lee · Jin-O Kim)

**Abstract** - During the last years, there has been an increased interest in the new energy such as photovoltaic(PV) system from the viewpoint of environmental pollution. In this regard, this paper estimates the power quality of grid-connected PV system. As the maximum power operating point(MPOP) of photovoltaic(PV) power systems alters with changing atmospheric conditions, the efficiency of maximum power point tracking(MPPT) is important in PV power systems. Moreover, grid-connected PV system occurs some problems such as voltage inequality and harmonics. Therefore, this paper presents the results of a grid-connected PV system modeling that contains incremental conductance MPPT controller by PSCAD/EMTDC simulator and investigates the influence that can occur in the grid-connected PV system from aspect of power quality, i.e. voltage drop, total harmonic distortion(THD) and total demand distortion(TDD). For the case study, the measured data of the PV array in Cheongwadae, Seoul, Korea is used.

**Key Words** : Power quality, Grid-connected PV System, MPPT, PSCAD/EMTDC

### 1. 서 론

최근 급속한 경제 발전과 국민 생활수준의 향상으로 최대 전력수요의 급증과 함께 발전설비의 용량 또한 높은 증가율을 보이고 있다. 따라서 화석연료 의존도가 높은 국내 발전설비의 현황을 고려하면, 이로 인한 에너지 고갈 및 환경오염 문제가 갈수록 심각해짐에 따라 무한 재생이 가능하고 환경오염을 유발시키지 않는 새로운 대체에너지의 보급이 시급한 시점이다.

기존에 개발된 여러 가지 대체에너지 자원 중, 특히 광전지(Photovoltaic Cell)는 환경오염 문제로부터 자유롭고 무한한 자원인 태양에너지를 직접 전기에너지로 변환하여 사용하므로, 태양광(Photovoltaic; PV) 발전시스템에 대한 관심은 더욱 고조되고 있다. 이에 국내에서는 정책적으로 총 소요금액의 70%까지 보조함으로써 2010년까지 3만호 이상의 주택용 태양광 발전시스템을 보급할 전망이다[3]. 또한 개발 초기에는 태양광전지는 가격이 매우 고가였지만, 최근 반도체 기술 및 제조공정의 발달로 인하여 수 년 이내에 태양광 발전시스템은 기존의 화석연료 발전시스템과 충분히 경쟁을 이룰 수 있을 것으로 사료된다.

태양광발전을 위한 광전지의 외부 환경조건, 즉 일사량, 셀의 온도, 부하 등에 따른 출력을 분석하면, I-V 특성곡선 및 P-V 특성곡선이 비선형적으로 변화되는 특징을 보인다.

따라서 태양광 전지는 주어진 외부조건에 대해 항상 최대 출력점을 추적(Maximum Power Point Tracking; MPPT)하는 알고리즘이 요구된다.

계통연계형 발전시스템은 인버터와 계통이 직접 연결되어 있기 때문에 인버터에서 발생하는 고조파가 직접 계통에 영향을 주게 되고 나아가서 이 계통과 연결된 다른 시스템에도 영향을 준다. 또한 계통연계 시 전압 불평형으로 인한 전력품질의 영향을 고려해야한다.

따라서 본 논문은 앞으로 보급 잠재력이 큰 태양광 발전 시스템을 PSCAD/EMTDC로 계통과 연계하여 모델링하고, 이에 따라 발생하는 전압품질을 분석하고 평가하였다. 또한 사례연구를 위해 청와대에 위치한 태양광 발전시스템의 태양광 Array 실측 Data를 사용하였으며, PV 시스템은 증분 컨덕턴스(Incremental Conductance; IncCond) 최대 출력점 추종(MPPT) 기법을 적용하여 모델링하였다.

### 2. 계통연계형 PV 시스템의 모델링

태양전지는 I-V 특성곡선 상의 전압 및 전류 동작점에 따라 그 출력이 결정된다. 즉 동일한 용량, 일사량 및 표면온도에서도 태양전지의 출력 전압 및 전류의 동작점에 따라 출력의 차이가 발생한다. 따라서 본 논문에서는 태양전지로부터 최대전력을 얻기 위해 P-V의 관계를 고려한 IncCond MPPT 제어 기법을 적용하였으며, 그림 1과 같이 DC-DC 컨버터, DC-AC 인버터, 단상 절연변압기(TR)를 거쳐 계통으로 연결되는 계통연계형 태양광 발전시스템을 구성하였다.

<sup>†</sup> 교신저자, 正會員 : 漢陽大 工大 電氣工學科 正教授 · 工博  
E-mail : jokim@hanyang.ac.kr

\* 學生會員 : 漢陽大 工大 電氣工學科 在學中

\*\* 正會員 : 漢陽大 工大 電氣工學科 博士課程

接受日字 : 2006年 8月 29日

最終完了 : 2006年 10月 28日

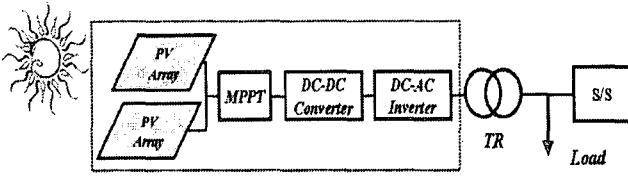


그림 1 계통연계형 태양광 발전시스템의 기본구성  
Fig. 1 Basic Scheme of Grid-connected PV system

2.1 증분컨덕턴스 최대 출력점 추종(MPPT) 제어

같은 조건에서 최대의 태양광발전을 얻기 위해 우선 광전지의 외부 환경조건, 즉 일사량, 셀의 온도, 부하 등에 따른 출력을 분석하여야 한다.

그림 2와 3은 일정한 외부 조건에서, 태양광 전지의 출력 I-V 및 P-V 특성곡선을 나타낸 것이다. 최대 출력 점 ( $P_{max}$ )은 단일 값을 갖는 특성을 보이고 있다. 다양한 외부조건 즉, 각각 일사량과 광전지 온도의 변화에 따른 출력 I-V 및 P-V 특성곡선을 나타내었다. 이러한 특성곡선은 태양광 전지의 출력 특성이 비선형적이기 때문에 다음 그림과 같이 그 결과를 얻는다[9].

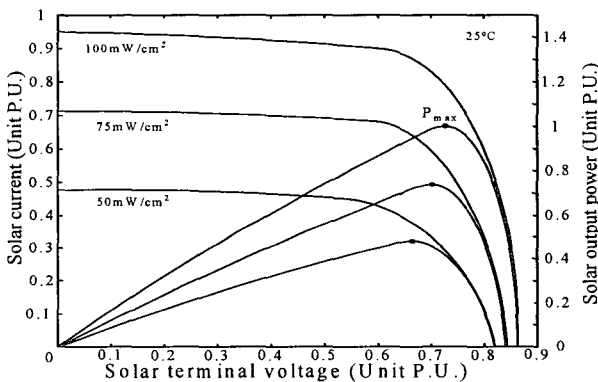


그림 2 일사량 변화  
Fig. 2 Variation of Solar-Energy Amount

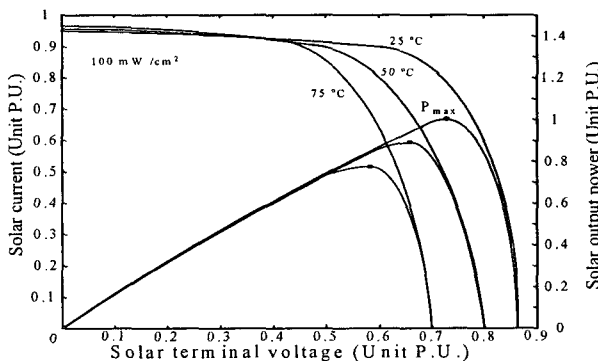


그림 3 온도변화  
Fig. 3 Variation of Temperature at Photovoltaic Cell

위 그림을 분석해 보면, 광전지의 출력전류는 일사량 변화에 대하여 주로 영향을 받는 반면, 광전지 출력전압은 태

양광 전지의 온도변화에 주로 영향을 받고 있다. 즉 일사량이 증가하면 출력전류가 증가하며, 온도가 증가하면 출력전압이 감소하는 특성을 알 수 있다[9].

따라서 일사량 및 온도의 변화에 의해 태양전지의 특성곡선이 변하게 되며 이에 따라 최대 출력점(Maximum Power Operating Point ; MPOP)도 계속 변하게 된다. 이에 MPPT 제어를 이용하여 이러한 외부 조건에 영향을 받지 않고 태양전지의 동작점을 항상 최대 출력점에 위치시키는 과정이 필요하다.

본 논문은 MPPT 제어를 위해 증분컨덕턴스 기법을 사용한다[7]. IncCond 기법은 태양전지의 컨덕턴스 및 컨덕턴스의 미분을 이용하여 최대 출력점을 판별하는 방법이다. 주요개념은 태양전지 출력전력이 최대전력 동작점 왼쪽에 위치했을 경우에 출력전력은 전압의 증가에 따라 증가하게 되며( $dP/dV > 0$ ), 반대로 최대전력 동작점의 오른쪽에 위치하였을 경우 출력전력은 전압의 감소에 따라 감소한다( $dP/dV < 0$ ).

최대 출력점에서 전력을 전압으로 미분하면 다음 식 (1)과 같이 나타내어진다.

$$\frac{dP}{dV} = I \frac{dV}{dV} + V \frac{dI}{dV} = I + V \frac{dI}{dV} \quad (1)$$

$$\frac{1}{V} \frac{dP}{dV} = \frac{I}{V} + \frac{dI}{dV} \quad (\text{where, } G = I/V, \Delta G = dI/dV) \quad (2)$$

식 (1)의 양변에  $1/V$ 를 곱하여 식 (2)와 같이 태양전지 컨덕턴스( $G$ )와 증분컨덕턴스( $\Delta G$ )를 정의한다. 결국, 태양전지 출력 전압을 최대 전력 동작점의 전압에 일치시키고 동시에  $G$ 와  $\Delta G$ 가 같아지도록 한다.

즉  $dI/dV = -I/V$ 일때 최대 출력점이 된다. 현재 전류, 전압 값을 측정하고 이전 제어주기의 전류, 전압 값과 비교하여  $dI, dV$  값을 계산하고,  $dI/dV$ 와  $-I/V$ 를 비교하게 된다. 그리고 비교 결과에 의해 기준 전압 값을 최대 출력점으로 향하도록 조절하게 된다. 최대 출력점에서는  $dI/dV = -I/V$ 가 되어 제어동작이 필요 없고 선행된 값을 그대로 저장하게 된다[7].

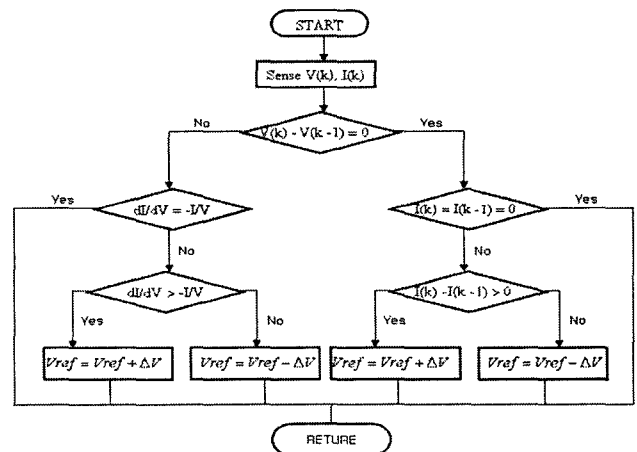


그림 4 증분컨덕턴스 MPPT 알고리즘  
Fig. 4 Algorithm of Incremental Conductance MPPT

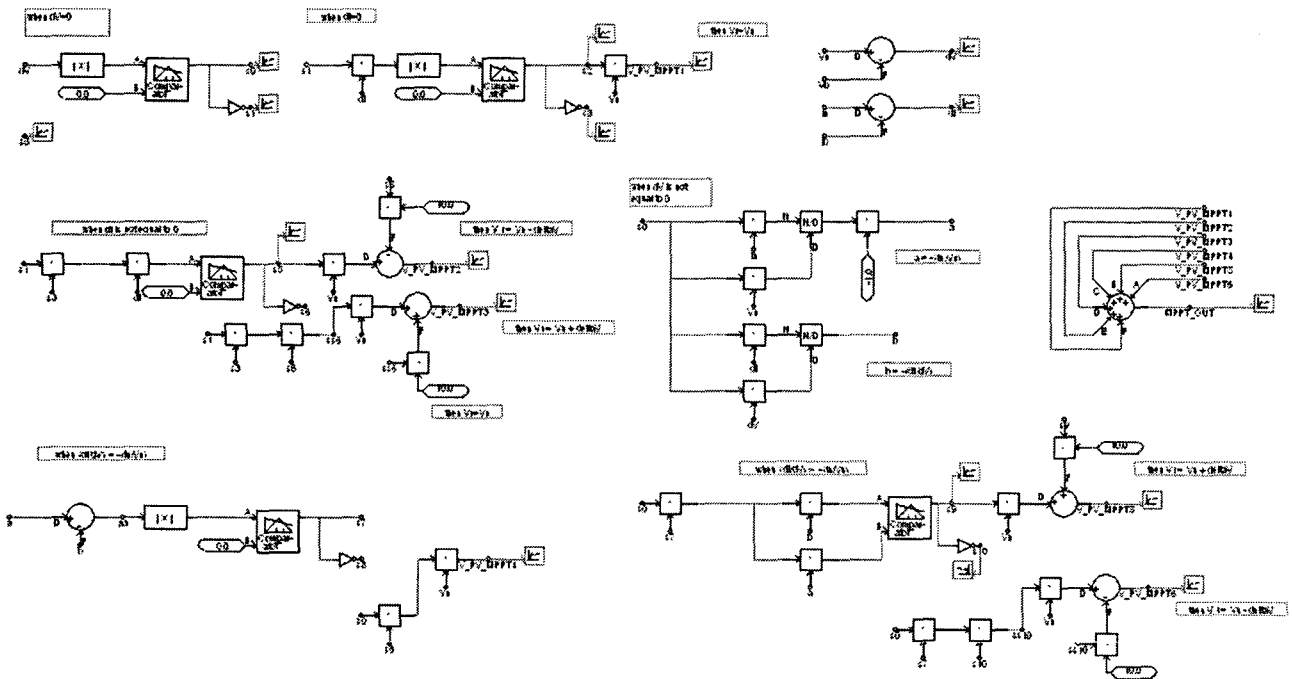


그림 5 증분컨덕턴스 MPPT를 PSCAD/EMTDC로 구현  
 Fig. 5 Incremental Conductance MPPT Modeling by PSCAD/EMTDC

증분컨덕턴스 기법은 일사량 변화나 온도변화 등 외부조건이 급변하는 경우에도 최대 전력점을 잘 추적한다.

그림 4는 앞에서 설명한 증분컨덕턴스 MPPT 제어의 전체 알고리즘을 나타내고 있다[1].

그림 5은 PSCAD/EMTDC로 증분컨덕턴스 알고리즘을 구현한 설계화면이다.

2.2 계통연계 모델링

태양전지 Array를 PSCAD/EMTDC로 구현하는 것은 Array의 비선형적이고 비정현적인 특성을 표현하는 것에 어려움이 있어 좀 더 정확한 출력전압 및 전력 생성에 초점을 맞춰 15.2 kW 출력의 청와대에 실제 설치된 태양광 발전시스템의 Array에서 2005년 7월 한 달간 평균 태양광 에레이의 전압과 전류를 데이터로 입력하는 시스템으로 3 kW급 태양광 발전시스템을 그림 6과 같이 구성하였다. 또한 실제 데이터는 1분단위로 입력되지만, 1분을 0.001로 계산하여 24시간을 0~1.44로 변환하여 모의하였다.

이 데이터의 값들을 외부조건이 급변하는 경우에도 최대 전력점을 잘 추적할 수 있는 증분컨덕턴스 MPPT 제어기에 입력시켰다. 증분컨덕턴스 법은 태양전지의 컨덕턴스 및 컨덕턴스의 미분을 이용하여 최대출력점으로 향하도록 조절하게 된다.

MPPT를 거친 출력전압은 태양광으로부터 얻은 직류를 DC-DC 컨버터를 이용하여 태양광 Array에서의 출력전압을 원하는 직류전압으로 변환한다. 이 논문에서 컨버터는 전압을 올리는 Step-up 방식을 따르는 부스트컨버터(Boost Converter)를 PSCAD/EMTDC를 이용하여 모델링하였다.

이 부스트컨버터는 태양광으로부터 얻은 에너지가 Array와 컨버터 및 인버터를 거치면서 손실되는 점을 고려하여 승압을 위해 사용되었고, 또한 MPPT에서 나온 리플전압을 평활화하는데 기여한다. 부스터컨버터에서 인덕터는 과전류의 발생시 전류의 값을 보다 안정되게 하여주며, 커패시터는 보다 안정된 전압을 얻게 하기 위해 사용하였다.

DC-DC 컨버터를 거치면서 얻어진 직류전압을 DC-AC 인버터를 이용하여 교류로 변환하여 계통에 연결할 수 있게 된다. 인버터는 높은 효율과 보다 안정된 교류파형을 얻을 수 있는 단일 전압 스위치(Unipolar Voltage Switch)를 이용한 PWM 풀브릿지(Full-Bridge) 인버터로 모델링하였다. 또한 계통연계시 연결된 절연변압기는 직류 성분을 차단할 목적으로, 수동필터는 안정된 교류 전압 및 전류를 생성할 목적으로 사용하였다[4, 5, 8].

그림 6은 본 논문에서 제안하는 계통 연계형 태양광 발전시스템을 PSCAD/ EMTDC로 구현한 것이다. 시스템의 주상변압기 이후 부분은 발전용량 3kw 이하의 가정용 부하에 연계되어있다고 가정하고, 상전압 220V에서의 한전 저압연계 역률기준 0.9이상을 고려하여 설계하였다.

3. 모델링 결과 분석 및 전력 품질 평가

사례 연구에서는 PSCAD/EMTDC로 구현된 3 kW급 태양광 발전시스템을 계통에 연결하여 전력품질을 평가하였다. 전력품질 평가항목은 전압강하와 고조파에 대한 평가항목인 전압의 총 고조파 왜형률(Total Harmonic Distortion ; THD) 및 전류의 총 수요 왜형률(Total Demand Distortion ; TDD) 이다.

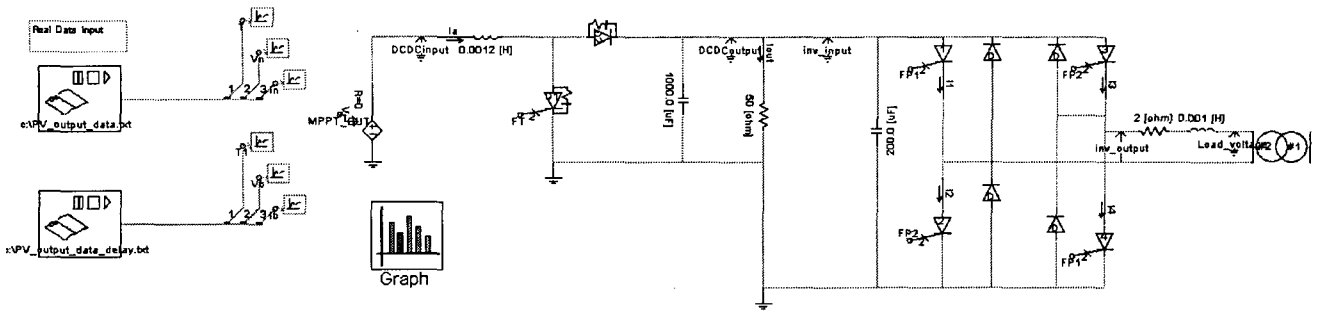


그림 6 PSCAD/EMTDC을 이용하여 모델링 된 계통연계형 태양광 발전시스템  
 Fig. 6 Grid-Connected Photovoltaic System Modeling by PSCAD/EMTDC

그림 7은 증분컨덕턴스 MPPT제어 전, 후의 전압파형의 일부분을 확대하여 비교한 것이다. 그래프에서 데이터의 값들이 급변하는 경우 MPPT제어 후 Bad Sector가 보정됨을 알 수 있다.

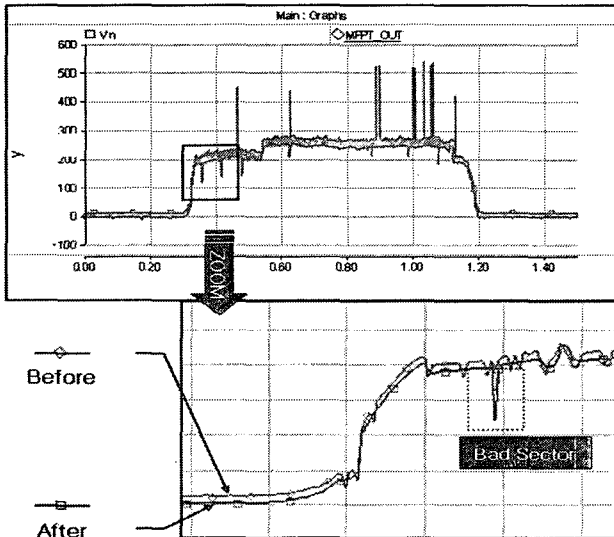


그림 7 MPPT 제어 전·후 전압비교파형  
 Fig. 7 Comparison of MPPT Controlled Voltage

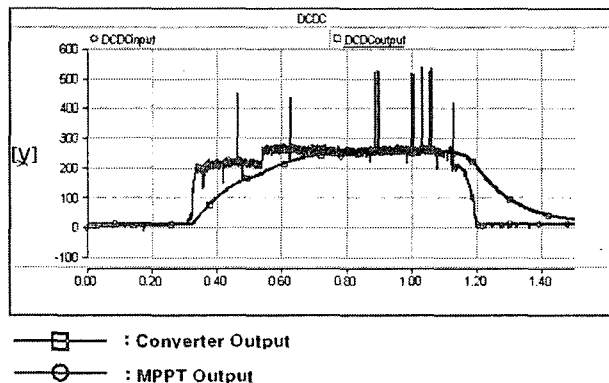


그림 8 MPPT 제어와 converter 출력 전압 비교 파형  
 Fig. 8 Comparison of MPPT Controlled Output Voltage and Converter Output Voltage

그림 8은 IncCond MPPT 제어 후의 전압 파형과 DC-DC 컨버터의 출력 전압 파형을 비교하고 있다. MPPT 제어 후의 전압파형이 DC-DC 컨버터를 거치면서 0.60(10시)~1.20(20시) 사이에서 250V의 비교적 안정한 직류로 변환된 것을 볼 수 있다.

DC-DC 컨버터를 거친 후의 직류 파형은 DC-AC 인버터를 거치면서 교류로 바뀌게 된다. 그림 9는 태양광발전기의 출력 중 계통을 대신해서 사용 가능한 0.60~1.20 사이의 DC-AC 인버터 출력 전류를 나타내고 있다.

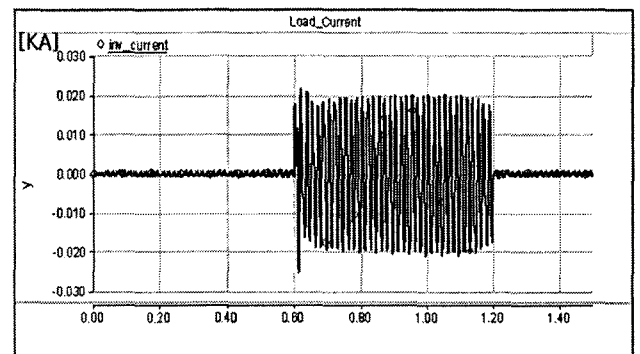


그림 9 DC-AC Inverter 출력 전류  
 Fig. 9 Output Current of DC-AC Inverter

그림 10은 지속적으로 공급되는 계통전압과 태양광 발전 시스템의 출력전압을 나타내고 있다.

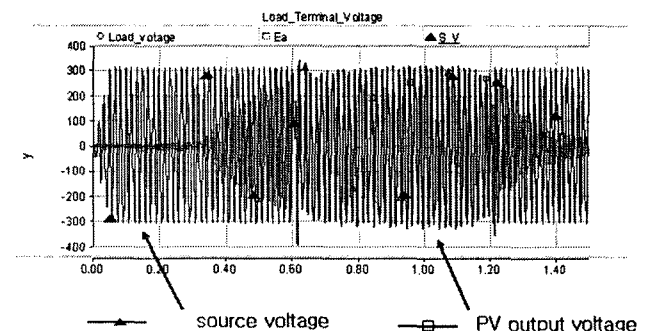


그림 10 부하 공급 전압 파형  
 Fig. 10 Voltage Waveform of Load

그림 11은 부하에 공급되는 전압과 전류파형을 나타낸 것으로 0.00~0.60과 1.20~1.44에서는 계통으로부터 전력을 공급 받지만 태양광 발전 시스템으로 대체 가능한 0.60~1.20에서는 태양광 발전시스템으로부터 전력을 공급 받고 있음을 나타내고 있다.

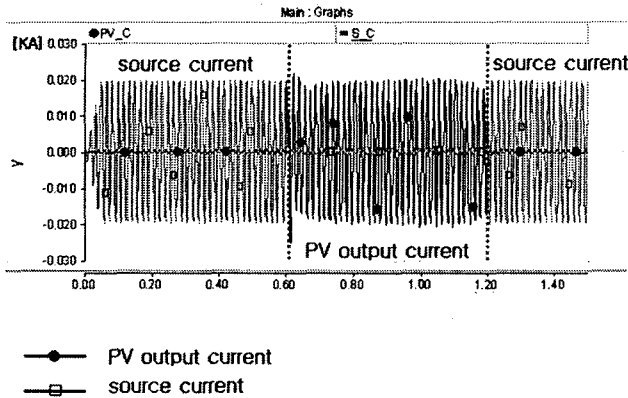


그림 11 부하 공급 전류 파형  
Fig. 11 current waveform of load

전압강하율, THD, TDD는 각각 식 (3), (4), (5)로 정의된다.

$$\text{Voltage Drop} [\%] = [(V_s - V_r) / V_r] \times 100 \quad (3)$$

$$\text{THD} = \frac{\sqrt{v_3^2 + v_5^2 + v_7^2 + v_9^2 + v_{11}^2 + v_{13}^2 + v_{15}^2}}{v_{fun}} \quad (4)$$

$$\text{TDD} = \frac{\sqrt{I_3^2 + I_5^2 + I_7^2 + I_9^2 + I_{11}^2 + I_{13}^2 + I_{15}^2}}{I_{rated}} \quad (5)$$

배전계통에 연계된 태양광 발전시스템의 경우 부하전압에 전압강하율은 4.238 [%]로 계산되었다. 한전기준은 10 [%] 이내로 계통연계형 태양광 발전시스템이 설치되어도 기준을 위반하지 않았다. 여기서  $V_s$ 는 무부하시 전압이며,  $V_r$ 은 전부하시 전압으로 정의한다[2].

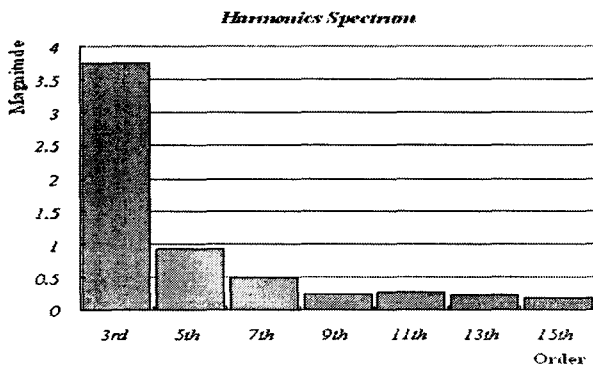


그림 12 부하전압의 각 고조파 스펙트럼  
Fig. 12 Harmonic Spectrum of Load Voltage

그림 12는 PV 시스템으로부터 부하에 공급되는 전압에서 발생하는 각 차수 고조파 크기를 FFT(Fast Fourier Transformation)한 결과를 보여준다.

표 1 전력품질평가

Table 1 Power Quality Assessment

구분	전압강하율	THD	TDD
기준범위	10%이하	5%이하	15%이하
결과값	4.238 %	1.899%	2.536%

THD와 TDD는 IEEE-519 기준을 참고하여 평가하였다 [6]. 표 1과 같이 IEEE에서 규정하는 THD 기준은 5 [%]이 내이나 시뮬레이션 결과는 1.899 [%]로 위반하지 않았고, TDD의 경우 흡수차 고조파의 평가는 최대부하전류와 단락 전류의 비가 172.05로  $100 < SCR < 1000$ 인 영역의 총 TDD 기준은 15 [%] 이내여야 하는데 2.536 [%]로 역시 위반하지 않았다.

#### 4. 결 론

태양광 Array로부터 최대 출력점을 추종하기 위한 증분 컨덕턴스 MPPT제어 기법을 사용하였다. 여기에 부스트 컨버터와 PWM full-bridge 인버터를 연결하여 가정용 3 kW 급 태양광 발전시스템을 PSCAD/EMTDC로 구현하였다.

전력품질을 평가하기 위해 모의한 결과, 전압강하율과 고조파의 THD 및 TDD 모두 한전 및 IEEE 규정에 적합하였다. 이 결과는 주상변압기에 3 kW급 가정용 PV시스템이 연계되어도 큰 영향이 없다는 것을 나타낸다. 또한 향후 다량의 가정용 PV시스템이 연계될 경우, 전력품질 면에서 전압강하와 고조파 등의 문제점은 본 연구를 기반으로 보다 광범위한 해석이 필요할 것으로 사료된다.

#### 감사의 글

본 연구는 2005년 한국과학재단의 지원에 의하여 이루어진 연구로서, (R01-2005-000-11214-0) 관계 부처에 감사드립니다.

#### 참 고 문 헌

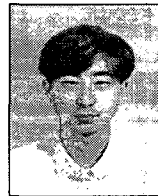
- [1] 이경수의 4인, “태양광 시스템에서의 새로운 MPPT 알고리즘 제안”, 전력전자학술대회논문집, 제10권 1호, pp. 21~28, 2005.
- [2] 정영석의 3인, “계통연계형 태양광 발전시스템의 배전계통에 미치는 영향”, 전력전자 학술대회 논문집 1998 Power Electronics Annual Conference, pp. 100~102, 1998.
- [3] 한석우, “계통연계형 PV시스템의 가동률 향상에 관한 연구”, 전력전자 학술대회 논문집(1), pp.97-100, 2004

- [4] Rashid, Muhammad H., Power electronics : circuits, devices, and applications, 3rd ed., Prentice Hall, 2005.
- [5] Ned Mohan, Tore M.Undeland, William P.Robbins, Power Electronics : converters, applications, and design 2nd ed., John Wiley & Sons, 1995.
- [6] IEEE Recommended Practices and Requirements for Harmonic Control in Electrical Power Systems, IEEE Standard pp.519, 1992.
- [7] 김태윤, 이윤규, 안호균, 박승규, “ 태양광 발전 시스템을 위한 새로운 최대 출력점 추종 제어 알고리즘”, 대한전기학회논문지: 전기기기 및 에너지변환시스템 부분 B, 제51권 3호, pp. 133~141, 2002.
- [8] 김슬기, 전진홍, 김용상, “PSCAD/EMTDC를 이용한 계통연계형 태양광발전시스템의 모델링 및 모의해석”, 대한전기학회논문지: 전력기술 부문A, 제54권3호, pp.107~116, 2005.
- [9] Nobuyoshi Mutoh, Masahiro Ohno, Takayoshi Inoue, “A Method for MPPT Control While Searching for Parameters Corresponding to Weather Conditions for PV Generation Systems” IEEE Trans. on Industrial Electronics, Vol. 53, No. 4, pp.1055~1065, 2006.



**김 동 민 (金 東 珉)**

1978년 9월 24일생. 2004년 한양대학교 전자전기공학부 졸업. 2005년~현재 동 대학원 전기공학과 석 박사 통합 과정.  
Tel : 02-2220-0347  
E-mail : rlaehdals@hanyang.ac.kr



**이 승 혁 (李 丞 赫)**

1974년 8월 3일생. 2003년 한양대학교 전기공학과 공학석사. 2007년 동 대학원 전기공학과 졸업 (공학박).  
Tel : 02-2220-0347  
E-mail : leesh93@hanyang.ac.kr



**김 진 오 (金 鎭 吾)**

1956년 1월 17일생. 1980년 서울대 전기공학과 졸업. 1982년 동 대학원 전기공학과 졸업. 1991년 Texas A&M Univ. 전기공학과 졸업 (공학박). 현재 한양대 전자전기컴퓨터공학부 정교수  
Tel : 02-2220-0347  
E-mail : jokim@hanyang.ac.kr

저 자 소 개



**설 재 응 (薛 在 雄)**

1981년 7월 23일생. 2003년~현재 한양대학교 전자전기컴퓨터공학부 재학중  
Tel : 02-2220-0347  
E-mail : rookie0723@hotmail.com



**장 재 정 (章 在 正)**

1981년 3월 16일생. 2003년~현재 한양대학교 전자전기컴퓨터공학부 재학중  
Tel : 02-2220-0347  
E-mail : wkdwowjd@hanmail.net