

전력품질개선기능을 갖는 계통연계형 태양광 발전시스템

高晟勳[†], 趙雅蘭^{*}, 姜大業^{**}, 朴天成^{***}, 全七煥^{***}, 李星龍^{***}

A Grid-interactive PV Generation System with the Function of the Power Quality Improvement

Sung-Hun Ko, Ah-Ran Cho, Dae-Up Kang, Chun-Sung Park, Chil-Hwan Jeon and Seong-Ryong Lee

요 약

본 논문에서는 전력품질개선기능을 갖는 계통연계형 태양광 발전시스템을 제안한다. 제안된 시스템은 전류제어형 전압원인버터 하나만을 사용하여 단위역률, 고조파저감 그리고 무효전력보상을 동시에 수행한다. 제안된 시스템의 동작모드는 2개의 모드로 구분할 수 있다. 야간모드에서는 PQC를 통해 부하에서 발생하는 무효전력을 보상한다. 주간모드에서는 고조파 저감 및 역률개선을 위한 PQC를 수행하면서 동시에 태양광의 최대전력을 발전하는 MPPT를 수행한다. 본 연구에서 제안한 시스템의 유용성을 확인하기 위해 시뮬레이션과 실험을 수행하였다.

ABSTRACT

In this paper, a grid-interactive photovoltaic (PV) system with the function of the power quality improvement is presented. The proposed system requires only one current-controlled voltage source inverter, which control the current flow at low total harmonic distortion and unity power factor, as well as simultaneously provide reactive power support. The proposed system operation has been divided into two modes (sunny and night). In night mode, the system operates to compensate the reactive power demanded by nonlinear or variation in loads. In sunny mode, the system performs power quality control (PQC) to reduce harmonic current and to improve power factor as well as maximum power point tracking (MPPT) to supply active power from the PV arrays, simultaneously. To verify the proposed system, a comprehensive evaluation included simulation and experimental results are presented.

Key Words : Power quality control, Maximum power point tracking, Current-controlled voltage source inverter

1. 서 론

최근 국제 유가의 급등 및 지구온난화를 해결하기 위한 온실가스 저감 문제 등으로 화석연료를 대체할

신재생에너지에 관한 연구가 전 세계적으로 주목받고 있다^[1-3]. 특히, 에너지의 97% 이상을 수입에 의존하는 우리나라는 에너지 산업구조를 원천적으로 개선하기 위해 총에너지의 5%를 신재생에너지로 공급한다는 목표를 설정하였으며, 이 중 태양광 발전 시스템인 경우, 태양광 주택 10만호 건설사업, 일반보급사업, 지역보급사업 등 정부 및 지자체 주도하에 급속하게 보급이 확대되고 있다. 태양광 발전은 에너지 변환 효율이 낮고, 일사량 및 온도에 따라 출력특성이 변화하기 때문에 에너지 손실의 최소화와 태양전지에서 최대 전

[†]교신저자 : 정회원, 전북대 BK21-전북 전자정보 고급인력 양성 사업단 박사후 연구원

E-mail : merchin@kunsan.ac.kr

^{*}학생회원, 군산대 전자정보공학부 조교

^{**}학생회원, 군산대 전자정보공학부 석사과정

^{***}정회원, 군산대 전자정보공학부 교수

접수일자 : 2007. 5. 22 1차 심사 : 2007. 6. 25

심사완료 : 2007. 7. 12

력을 얻을 수 있는 MPPT(Maximum Power Point Tracking) 제어가 필요하다^[4-6].

일반적으로 계통연계형 태양광 발전시스템은 태양 전지, MPPT 컨버터, 태양전지에서 발전된 전력을 계통에 공급하기 위한 인버터로 구성된다. 이러한 기존의 시스템은 단순히 태양광으로부터 발전된 전력을 컨버터(또는 인버터)의 MPPT 제어에 의하여 계통에 공급하는 방식으로 일사량이 있는 주간에만 이용할 수 있어 높은 설치비에 비하여 이용률(5~6시간/일)이 매우 저조할 뿐만 아니라, 주택 및 오피스 빌딩 등과 같은 비선형 및 역률 부하에 적용 시 태양광 발전에 의한 유효전력 지원으로 계통의 역률은 오히려 악화되는 문제점을 가지고 있다. 일반적으로 계통에 역률이 발생하면 동일한 유효전력 수요에도 무효전력을 고려하여 공급해야 하기 때문에 계통의 공급전력요구량이 증가하게 된다. 현재 설치된 시스템의 규모가 작기 때문에 계통에 큰 문제가 되지 않지만, 앞서 언급한 것처럼 보급이 크게 확대되고 있는 실정을 감안하면 계통연계에 의한 문제가 발생할 수 있다. 또한, 컴퓨터 및 현대적인 전자기기 같은 비선형 부하의 급증은 계통의 고조파 증가 및 역률 감소 같은 계통의 전력품질은 물론 전기기기의 오동작 및 전력변환기의 정격용량증가 같은 문제점이 발생하게 된다. 이에 따라 IEEE-standard 및 한전 배전계통 공급기준 등에서는 전력품질 기준을 설정하고 엄격하게 규제하고 있다^[7]. 이러한 배전계통의 전력품질을 향상시키는 방안으로 능동전력 필터 및 UPQC(Unified Power Quality Conditioner) 등의 연구가 활발하게 진행되고 있다. 하지만, 능동전력 필터는 상대적으로 시스템 가격이 고가일 뿐 아니라 기존의 태양광 발전시스템에 추가로 설치해야 하기 때문에 전체 시스템의 대형화 및 가격이 상승하게 된다. 따라서 이러한 문제점을 해결하고 전체시스템의 효율성 향상 및 소형경량화를 이루기 위해서는 기존의 계통연계형 태양광 발전시스템에 추가적인 장치 없이 한전 배전계통 공급기준을 만족하는 전력품질(역률 0.9 이상, THD: 5%이내) 개선, MPPT 제어를 통한 최대 전력 발전, 시스템 이용률 향상(100%)등을 모두 만족하는 시스템의 개발이 필요하다.

그러므로, 본 연구에서는 태양광 발전시스템의 활용도를 높이고 설치효과를 극대화하기 위해 전력품질개선기능을 갖는 계통연계형 태양광 발전시스템을 제안한다. 제안된 시스템은 태양광을 에너지원으로 하여 전력을 발전하는 태양전지와 발전된 전력을 계통(또는 부하)에 공급하는 전류제어형 전압원인버터(CCVSI:

Current-Controlled Voltage Source Inverter)로 구성되며, 주간모드 및 야간모드로 운전된다. 야간 모드에서는 PQC(Power Quality Control)를 통해 계통의 고조파 저감 및 역률개선 기능을 수행하며, 일사량이 있는 주간 모드에서는 태양전지로부터 최대출력을 얻기 위한 MPPT 제어와 PQC를 동시에 수행하게 된다. 제안된 시스템은 양방향으로 전력수수가 가능한 CCVSI 하나만을 사용하여 태양광 발전의 최대전력생산 뿐 아니라 역률 개선 및 고조파 저감 등을 통해 계통의 품질을 향상시킬 수 있다. 이는 주간(일사량이 존재하는)에만 운전되는 기존의 시스템과 비교하여 이용률(24/일)을 극대화 시킬 수 있으며, 추가적인 장치 없이 태양광 최대전력생산 및 전력품질개선을 동시에 수행할 수 있어 효율성 향상 및 소형경량화를 이룰 수 있다. 본 논문에서는 제안된 시스템의 동작원리 및 제어 알고리즘을 이론적으로 해석하고, 시뮬레이션 및 실험을 통하여 유용성을 확인하였다.

2. 시스템 해석 및 동작원리

일반적인 계통연계형 태양광 발전 시스템은 MPPT 제어를 위한 dc/dc 컨버터와 발전된 전력을 계통에 공급하기 위한 dc/ac 인버터로 구성되는 two-stage 방식을 주로 채택하고 있다^[8-9]. 이 시스템은 컨버터를 사용함으로써 DC 입력전압의 범위가 넓은 장점이 있는 반면, 시스템의 컴포넌트 증가로 인해 시스템의 대형화, 가격상승 그리고 전력변환 효율이 낮아지는 단점이 있다^[9]. 본 연구에서는 이런 단점을 보완하기 위해 그림 1과 같은 dc/ac 인버터 하나만을 사용하는 single-stage 방식을 채택하였다.

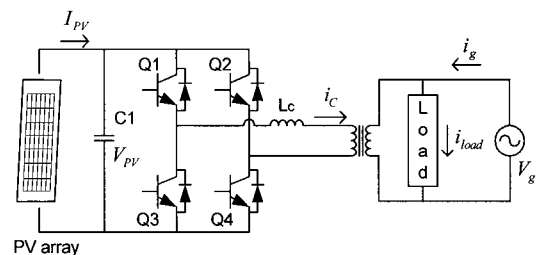


그림 1 Single-stage 방식의 계통연계형 태양광 발전시스템 회로도
Fig. 1 Schematic diagram of a single-stage grid-interactive PV generation system

그림 1의 single-stage 방식의 토폴로지는 태양전지와 전압원인버터로 구성된다. 여기서 인버터는 태양광에서 발전된 전력(직류)을 교류로 바꾸는 전력변환뿐

아니라 계통과 연계하여 운전해야하기 때문에 인버터의 특성이 전체 시스템의 성능을 좌우한다. 본 연구에서는 태양전지의 최대전력을 추종하면서 부하조건에 따라 계통의 전력품질개선(고조파 감소 및 역률 향상) 기능을 동시에 수행할 수 있도록 인버터의 출력전류를 직접 제어할 수 있는 CCVSI를 사용한다. CCVSI는 응답속도가 빠르며 인버터의 입력변동에도 지령전류를 강인하게 추종할 수 있기 때문에 고조파 저감 성능이 우수하며 단위역률(unity power factor)제어가 가능하다^[10]. CCVSI의 입력단은 DC 링크 캐패시터를 통해 태양전지와 연결되며, 출력은 변압기를 통해 계통과 병렬로 연결된다.

그림 2와 3은 본 연구에서 제안한 시스템의 등가회로도도와 동작모드에 따른 벡터도이다. 제안된 시스템은 일사량이 없는 야간모드에서는 PQC를 통해 계통의 고조파 저감 및 역률개선기능을 수행하며, 일사량이 존재하는 주간모드에서는 MPPT 제어를 통해 태양전지의 최대전력을 생산하면서 동시에 단위역률제어 및 고조파 기능을 수행하게 된다.

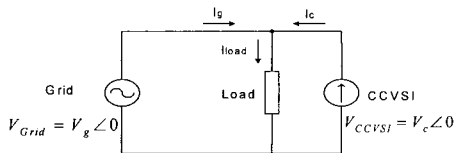


그림 2 제안된 시스템의 등가회로도
Fig. 2 The equivalent circuit diagram of the proposed system

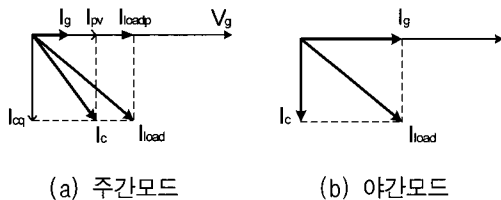


그림 3 제안된 시스템의 동작모드별 벡터도
Fig. 3 Phasor diagram of the proposed system at each operation mode

그림 2에서처럼 제안된 시스템의 CCVSI는 교류전류원으로 해석할 수 있으며, 계통전압(V_g), 인버터전압(V_c) 그리고 부하전압(V_{load})은 병렬로 연결된 형태로 크기 및 위상은 같다. 그림 3에서처럼 부하전류(I_{load})는 계통전류(I_g)와 인버터전류(I_c)에 의해 공급되며 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$I_{load} = I_g + I_c \quad (1)$$

여기서 계통의 단위역률제어를 위해서는 계통은 항상 유효전력성분만을 포함해야 한다. 시스템이 야간모드로 운전될 경우, 그림 3의 (b)와 같이 부하에서 요구되는 무효전력성분(고조파 포함)은 인버터에서 전부 공급하고 부하에서 요구되는 유효전력성분은 계통에서 공급해야 된다. 따라서 야간모드에서 요구되는 계통전류(I_g^*)는 다음과 같이 구할 수 있다.

$$I_g^* = Re [I_{load}] = \frac{P_{load}}{V_g} \quad (2)$$

여기서, P_{load} 는 부하유효전력이다.

시스템이 주간모드로 운전될 경우, 그림 3의 (a)와 같이 부하에서 요구되는 유효전류(I_{loadp})는 태양광 발전전류(I_{pv})와 계통전류(I_g)에 의해 공급되며, 이때에도 부하에서 요구되는 무효전류($I_{loadq}=I_{cq}$)는 인버터에서 전부 공급하게 된다. 여기서 태양광 발전전류는 태양광에서 최대전력을 발전할 수 있도록 제어해야 한다. 태양전지 출력특성을 해석하기 위해 일반적으로 사용되는 one-diode 모델의 등가회로를 이용하면 식 (3)과 같이 태양전지의 출력전류(I_{pv})를 구할 수 있다.

$$I_{pv} = I_g - I_{sat} \left[\exp\left(\frac{q(V_{pv} + I_{pv}R_s)}{AKT}\right) - 1 \right] - \frac{V_{pv} + I_{pv}R_s}{R_{sh}} \quad (3)$$

여기서, I_{pv} 와 V_{pv} 는 태양전지의 출력전류와 전압, I_g 는 광전류, I_{sat} 는 태양전지의 포화전류, R_s 와 R_{sh} 는 내부 직렬저항 및 병렬저항, q 는 전하량, A 는 p-n 접합 재료 계수, K 는 볼츠만 상수(Boltzmann's constant), T 는 태양전지 온도이다. 여기서 태양전지가 이상적이라고 가정하면 내부직렬저항 및 병렬저항은 무시할 수 있으며, 식 (3)은 식 (4)와 같이 간단하게 표현할 수 있다.

$$I_{pv} = I_g - I_{sat} \left[\exp\left(\frac{qV_{pv}}{AKT}\right) - 1 \right] \quad (4)$$

태양전지의 출력은 일사량 및 온도에 따른 기후변화와 부하조건에 따라 특성이 변하기 때문에 태양전지의 최대 출력을 얻을 수 있는 MPPT 제어가 필요하며, 이런 MPPT 제어의 대표적인 방법으로 P&O (Perturbation and Observation)방법과 IncCond(Incremental Conductance)방법이 주로 사용된다^[9,11]. P&O 방법은 MPP를 추종하기 위해 태양전지의 전력과 전압을 측정하여 단지 지령전압을 증가 또는 감소시키는 방법으로 제어는 용이하나 빠른 환경변화에 민감하게 변화할 수 없는 단점을 가진다. IncCond 방법은 태양전지의 출력컨덕턴스와 증분컨덕턴스

를 비교하여 MPP를 추종하는 방법으로 P&O 방법과 비교하여 빠른 환경변화에 민감하게 MPPT를 추종할 수 있지만 많은 연산이 필요하게 되어 성능이 우수한 제어기가 요구된다. 이런 단점을 보완하기 위해 전력대 전압의 기울기(dP/dV)를 가지고 쉽고 빠르게 추종할 수 있는 MPPT 제어방법이 제안되었다^[9]. 전력대 전압의 기울기는 식 (4)를 이용하여 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\frac{dP}{dV} = I_{pv} + \frac{dI_{pv}}{dV_{pv}} V = I_g - I_{sat} \left[\exp\left(\frac{qV_{pv}}{AKT}\right) - 1 \right] - \frac{qI_{sat}}{AKT} \exp\left(\frac{qV_{pv}}{AKT}\right) V_{pv} \quad (5)$$

$$\frac{dP}{dV} \cong I + \frac{\Delta I}{\Delta V} V \quad (6)$$

여기서, dP/dV 는 전류증가분(ΔI)과 전압증가분(ΔV)을 이용하여 식 (6)으로 대체할 수 있다. $dP/dV < 0$ 일 때는 지령전압을 감소시켜 dP/dV 를 "0"에 근접시키고 $dP/dV > 0$ 일 때는 지령전압을 증가시켜 dP/dV 를 "0"에 근접시킨다. 이 방법은 단지 하나의 나눗셈과 곱셈의 연산만으로 지령치를 생성할 수 있기 때문에 IncCond 방법에 비해 제어기가 쉬운 장점이 있다. 제안된 시스템은 주간모드일 경우, 이 방법을 채택하여 태양전지에서 최대전력을 발전하면서 동시에 부하에서 요구되는 무효전력성분을 공급하게 된다. 따라서 주간모드에서 요구되는 계통전류(I_g^*)는 다음과 같이 구할 수 있다.

$$I_g^* = Re[I_{load}] - Re[I_c] = \frac{P_{load} - P_{pv}}{V_g} \quad (7)$$

여기서, P_{pv} 는 최대출력전압(V_{mpp})으로 운전할 때의 태양광 출력전력이다.

제안된 시스템은 야간모드일 경우 부하에서 발생하는 무효전력을 보상하고, 야간모드일 경우에는 태양전지의 최대전력과 부하에서 발생하는 무효전력을 동시에 공급한다. 따라서 제안된 시스템은 일사량 및 부하조건에 따라 최대전력추종, 역률개선 그리고 고조파저감 기능을 동시에 수행할 수 있도록 인버터 출력전류를 제어한다.

그림 4는 제안된 시스템의 제어블록도로 태양전지의 최대출력을 위한 MPPT 제어기와 전력품질개선을 위한 PQC 제어기를 이용하여 인버터의 최종지령전류(I_{c-ref}^*)를 생성한다. 생성된 인버터 최종지령전류와 실제 인버터 전류를 이용하여 PRT(Polarized Ramp Time) 전류제어^[12]를 통해 인버터를 구동하게 된다.

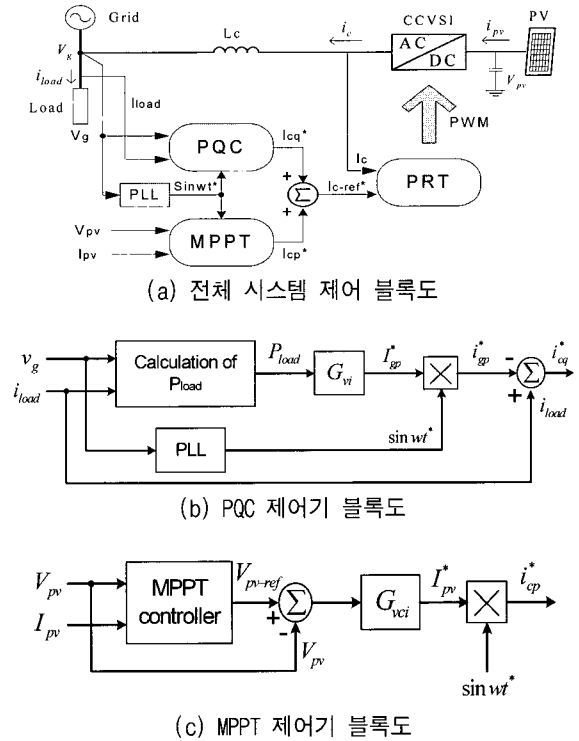


그림 4 제안된 시스템의 제어 블록도
Fig. 4 Control block diagram of proposed system

이를 구체적으로 설명하면 다음과 같다. 먼저 제안된 시스템은 일사량 및 부하조건을 확인하기 위해 계통전압(V_g)과 부하전류(I_{load}) 그리고 태양전지의 전압(V_{pv})과 전류(I_{pv})를 측정하게 되는데, 이때 측정된 일사량 및 부하조건에 따라 일사량이 존재하지 않는 야간모드의 경우 PQC 제어기[그림 4 (b)]만, 일사량이 존재하는 주간모드일 경우 PQC 및 MPPT 제어기[그림 4 (c)]가 동시에 동작하여 인버터의 최종지령전류(i_{c-ref}^*)를 생성한다.

즉, 야간모드일 경우 그림 4 (b)의 PQC 제어기에 의해 계통전압(V_g)과 부하전류(I_{load})를 측정하여 부하의 유효전력(P_{load})을 연산한다. 여기서 부하의 유효전력은 전부 계통에서 공급해야 해야 하며, 식 (2)에 의해 요구되는 계통의 유효전류(또는 부하의 유효전류)를 구할 수 있다. 연산된 계통의 유효전류(I_{gp}^*)와 PLL를 통해 계통과 동기화된 $\sin \omega t^*$ 를 이용하여 다음과 같이 인버터의 무효지령전류(i_{cq}^*)를 생성한다.

$$i_{cq}^* = i_{load} - i_{gp}^* \quad (8)$$

따라서 제안된 시스템의 야간모드시 최종지령전류

(i_{c-ref}^*) 는 인버터의 무효지령전류(i_{cq}^*)가 된다.

한편, 주간모드의 경우 측정된 태양전지의 전압과 전류를 이용하여 앞서 언급한 전력대 전압의 기울기 (dP/dV)를 이용한 MPPT 제어기[그림 4 (c)]를^[9] 통해 태양전지의 최대출력을 발전할 수 있는 태양전지 출력전류(i_{pv}^*)를 연산한다. 연산된 태양전지 출력전류와 계통과 동기화된 $\sin\omega t^*$ 를 이용하여 인버터의 유효지령전류(i_{cp}^*)를 생성한다. 동시에 전력품질개선을 위해 PQC 제어기[그림 4 (b)]가 식 (7)에 의하여 MPPT 제어기에 의해 산출된 유효전력을 상쇄한 계통전류(I_g^*)를 계산한다. 따라서 연산된 계통전류(I_g^*)를 이용하여 그림 4 (c)의 PQC 제어기를 통해 인버터의 무효지령전류(i_{cq}^*)를 구한 다음, 식 (9)에 의해 최종지령전류(i_{c-ref}^*)를 구할 수 있다.

$$i_{c-ref}^* = i_{cp}^* + i_{cq}^* \tag{9}$$

제안된 시스템은 생성된 최종지령전류(i_{c-ref}^*)와 측정된 실제 인버터 전류(i_c)를 가지고 PRT 전류제어를 통해 PWM 스위칭 패턴을 결정한다. PRT 전류제어는 실제전류와 지령전류의 오차신호만을 이용하여 인버터 구동을 위한 PWM 스위칭 패턴을 생성하며, 히스테리시스 전류 제어의 단점인 가변스위칭 주파수를 해결할 수 있다.

3. 시뮬레이션 및 실험

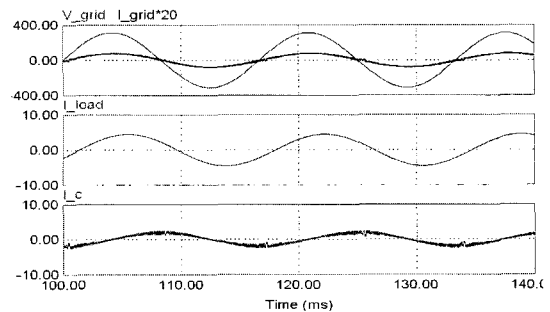
본 연구에서 제안한 전력품질개선기능을 갖는 계통연계형 태양광 발전시스템의 유용성을 확인하기 위하여 시뮬레이션과 1[KVA]급 시작품을 제작하여 실험하였다. 실험에 사용된 태양전지는 LS 산전의 GMG 01800의 태양전지 모듈 14개를 직렬로 구성하였다. GMG 01800은 출력전력 80[W], 전압 17.6[V], 오픈전압 21.6[V], 전류 4.55[A], 단락전류는 5[A]이다. 시뮬레이션 결과와 실험 결과를 비교·분석하기 위해 시뮬레이션 조건과 실험조건은 동일하게 설정하였으며 표 1과 같다.

표 1 시뮬레이션 및 실험 조건
Table 1 Simulation and experiment conditions and parameters

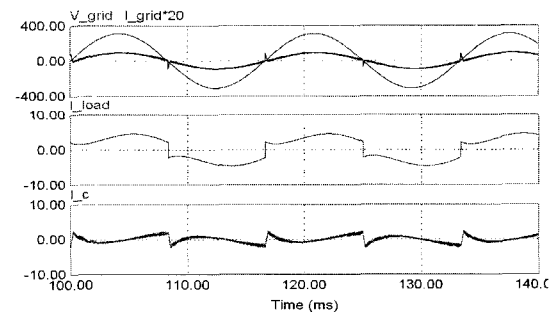
Parameters	Values	Parameters	Values
계통전압	220Vrms	인버터 입력전압	230[±70V]
기본 주파수	60Hz	스위칭 주파수	5kHz
필터 인덕터(L_c)	5mH	DC 링크 캐패시터	1000uF
변압기 권선비	1 : 2	최대부하용량	1KVA

3.1 시뮬레이션 결과

제안된 시스템의 유용성을 확인하기 위하여 컴퓨터 시뮬레이션 프로그램인 PSIM을 이용하여 시뮬레이션을 수행하였다. 태양전지는 GMG 01800의 파라미터를 기준으로 C 언어를 이용하여 DLL 파일로 구성하였다. 그림 5는 제안된 시스템이 야간모드로 운전될 경우의 시뮬레이션 결과 파형으로 (a)는 유도성 부하, (b)는 비선형 부하로 (a)의 유도성 부하에 정류기를 추가한 형태이다. 그림 5에서 V_{grid} 와 I_{grid} 는 계통 전압과 전류이며, I_{load} 는 부하전류 I_c 는 인버터 출력전류이다.



(a) 유도성 부하 (Z:69∠29.5)

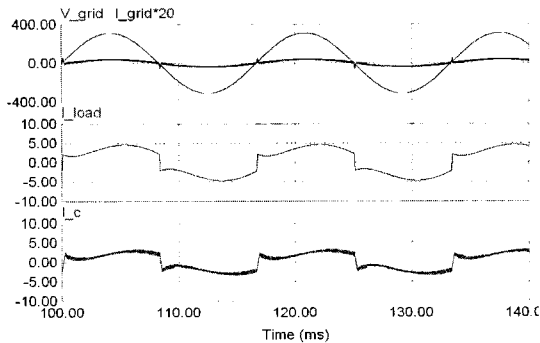


(b) 비선형 부하(유도성 정류기 부하)

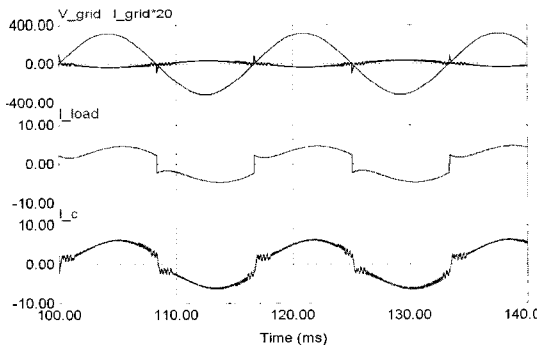
그림 5 제안된 시스템의 야간모드시 시뮬레이션 결과
Fig. 5 Simulation results of proposed system at night mode

그림 5 (a)는 부하각이 약 29.5°인 역률 0.87(지상)의 유도성 부하로 부하 전력은 약 611[W]의 유효전력 성분과 약 345[var]의 무효전력성분으로 구성된다. 제안된 시스템은 PQC를 통해 부하에서 요구되는 무효전력 성분을 보상함으로써 계통의 전압과 전류의 위상차는 거의 “0”임을 확인할 수 있다. 그림 5 (b)는 (a)의 부하조건에서 정류기를 추가한 형태의 유도성 정류기 부하로, 제안된 시스템은 계통의 고조파성분이 포함된 무효전력을 보상함으로써 계통전류는 왜곡 없는 정현파임을 확인할 수 있다. 여기서 계통전류가 “0” 교차점

(zero crossing)에서 약간의 서지가 발생하게 되는데 이는 유도성 정류기 부하의 특성으로 계통에 리액터를 추가하거나 인버터의 스위칭 주파수를 증가시켜 출력 전류의 동특성을 향상시키면 해결할 수 있다. 그림 6은 제안된 시스템이 주간모드로 운전될 경우의 시뮬레이션 파형으로 부하조건은 그림 5 (b)와 동일하며 그림 6 (a)는 일사량이 500(W/m²), (b)는 일사량이 1000 (W/m²)이고 온도는 25(°C)로 설정하였다.



(a) S=500(W/m²), T=25(°C)



(b) S=1000(W/m²), T=25(°C)

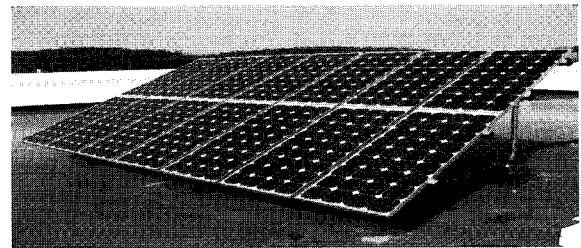
그림 6 제안된 시스템의 주간모드 시 시뮬레이션 결과
Fig. 6 Simulation results of proposed system at sunny mode

그림 6에서 제안된 시스템은 일사량이 존재할 경우, MPPT 제어를 통해 MPP를 추종할 수 있는 유효지령 전류와 부하조건에 따라 계통의 고조파성분을 포함한 무효전력을 보상할 수 있는 무효지령전류를 동시에 생성하여, 태양전지의 최대출력을 이용한 유효전력의 공급뿐 아니라 부하에서 요구되는 무효전력을 동시에 보상할 수 있다. 그림 6 (a)는 일사량이 500(W/m²)일 경우로 부하에서 요구되는 유효전력과 무효전력을 인버터에서 공급하며, 계통은 부하 유효전력의 나머지 부분만을 공급하고 있음을 알 수 있다. 또한, 그림 6 (b)

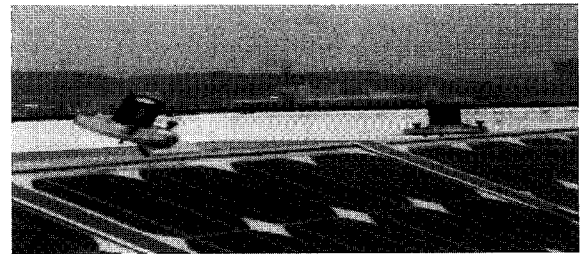
는 일사량이 1000(W/m²)일 경우로 부하에서 요구되는 유효전력과 무효전력을 인버터에서 전부 공급하고, 남은 전력은 계통에 공급하고 있음을 알 수 있다. 따라서 제안된 시스템은 비선형 부하를 포함한 모든 부하 조건에서 MPPT 제어를 통해 태양전지의 최대전력을 얻음과 동시에 역률개선 및 고조파 저감 기능을 수행할 수 있다.

3.2 실험 결과

제안된 시스템의 유용성을 확인하기 위해 1[KVA]급 시작품을 제작 실험하였다. CCVSI의 스위칭 소자는 IGBT를 사용하였고, 전체 시스템의 제어기로 TI사의 DSP 320C33을 이용하였다. 태양전지는 LG 산전의 GMG 01800를 14개로 직렬로 연결하여 구성하였고, 일사량 및 온도 측정은 Delta OHM사의 LP RAD 01을 이용하였다. 태양전지는 그림 7과 같이 본 학부의 건물 옥상에 설치되어 있으며 시작품과의 거리는 약 120m로 케이블로 연결되어 있다.



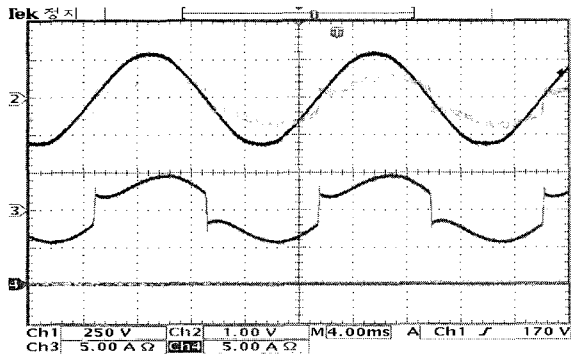
(a) 태양전지



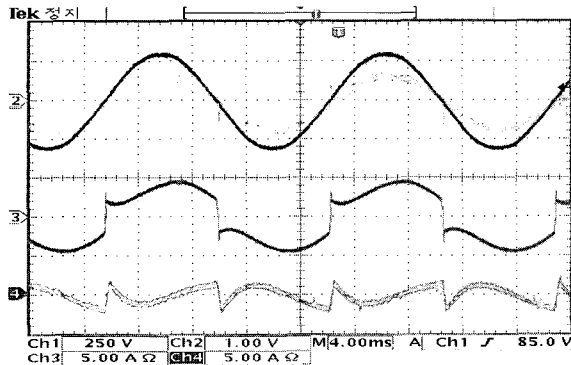
(b) 일사량 및 온도센서

그림 7 제안된 시스템의 태양전지 어레이 사진
Fig. 7 Photograph of PV array of proposed system

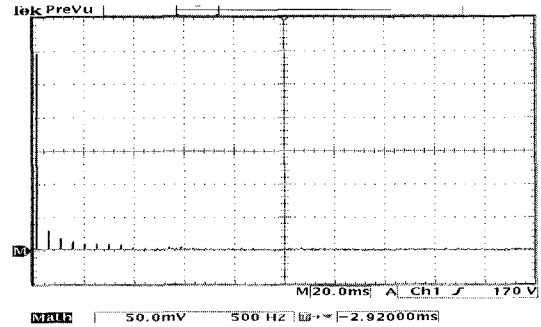
그림 8은 제안된 시스템이 야간모드로 운전될 경우의 실험 결과 파형으로 부하조건은 그림 5 (b)의 시뮬레이션 조건과 동일하다. 그림 8 (a)는 PQC 동작을 하지 않았을 경우, (b)는 PQC 동작을 수행 했을 때의 파형으로, 위에서부터 계통전압(CH1), 계통전류(CH2), 부하전류(CH3), 인버터전류(CH4)이다.



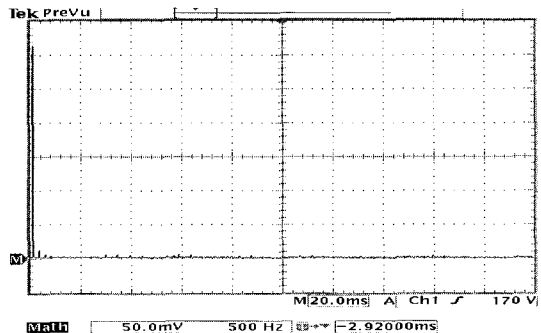
(a) 비제어시



(b) PQC



(a) 비제어시



(b) PQC

그림 8 제안된 시스템의 야간모드시 실험결과
Fig. 8 Experimental results of proposed system at night mode

그림 8에서 제안된 시스템은 일사량이 없는 야간 모드의 경우, 부하에서 요구되는 유효전력은 계통에서 공급하고 무효전력은 인버터에서 공급하고 있음을 알 수 있다. 여기서 계통전류의 파형이 전압 대비전인 이유는 전류센서(LA25P)를 통해 전류를 전압형태로 표현한 것으로 전압 대 전류 비율은 약 1:7 정도이다. 그림 9는 그림 8의 계통전류의 FFT 스펙트럼 파형으로 TDS3054B의 MATH 기능에서 제공하는 FFT 모듈을 사용하였으며 전력, 역률 및 THD는 Voltech사의 PM3000 전력분석기를 이용하여 측정하였다.

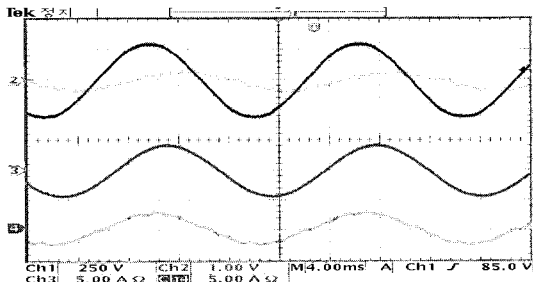
그림 9 (a)는 그림 8 (a)의 계통전류의 FFT 파형으로 THD는 약 25.4[%], 역률은 0.94 정도로 측정되었다. 그림 9 (b)는 그림 8 (b)의 계통전류의 FFT 파형으로 THD는 약 3.8[%], 역률은 0.99로 측정되었다. 이의 실험결과는 그림 5의 시뮬레이션 결과와 비슷하며 제안된 시스템은 비선형 부하조건에서도 계통 역률은 항상 0.99이상 유지시키면서 THD는 5[%] 이내로 만족함을 확인 할 수 있었다.

그림 9 비선형 부하 시 계통전류의 FFT 파형
Fig. 9 FFT waveforms of the grid current at nonlinear load

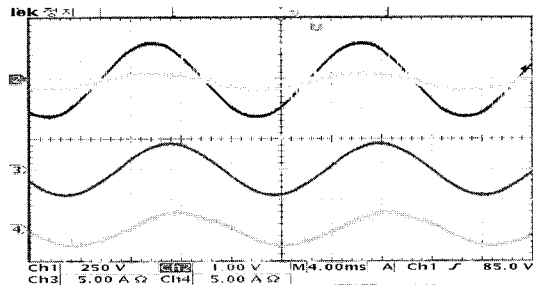
그림 10~11은 제안된 시스템이 주간모드로 운전될 경우의 실험 결과 파형으로 위에서부터 계통전압(CH1), 계통전류(CH2), 부하전류(CH3), 인버터전류(CH4)이다. 그림 10은 그림 5 (a)의 유도성 부하조건에서 (a)는 MPPT만을 수행할 경우(기존의 시스템 방식) (b)는 MPPT와 PQC를 동시에 수행할 때의(제안된 시스템 방식) 실험 파형이다.

그림 10 (a)의 MPPT 제어만을 수행했을 경우에는 계통의 유효전력 공급량을 감소시켜 역률(0.86에서 0.51로 감소)은 더욱 악화시킴을 알 수 있다. 그러나 그림 10 (b)의 제안된 시스템은 MPPT와 PQC를 동시에 수행하여 MPPT를 통한 유효전력 공급 뿐 아니라 계통의 무효전력을 보상함으로써 계통의 역률(0.99)은 향상시킴을 알 수 있다. 그림 11은 그림 8과 동일한 부하조건에서 (a)는 일사량이 약 470(W/m²), (b)는 일사량이 약 930(W/m²)일 때의 실험결과 파형이다.

그림 11 (a)는 일사량이 약 470(W/m²) 일 경우로 부하에서 요구되는 유효전력은 태양전지에서 발전된 전력과 계통에서 부담하고, 무효전력은 인버터에서 전부 공급하고 있음을 알 수 있다.



(a) 기존의 시스템 방식



(b) 제안된 시스템 방식

그림 10 제안된 시스템의 주간모드 시 실험결과(유도성 부하)
Fig. 10 Experimental results at sunny mode (inductive load condition)

그림 11 (b)는 일사량이 890(W/m²)일 경우로 태양 전지에서 발전된 전력을 이용하여 부하에서 요구되는 유효전력을 공급하고 남은 전력은 계통에 공급하고 있음을 알 수 있다. 이때에도 부하에서 요구되는 무효전력은 인버터에서 전부 공급하고 있음을 확인할 수 있다. 이의 실험 결과는 그림 6의 시뮬레이션 결과와 비슷하며 제안된 시스템은 선형 및 비선형 부하조건에서도 MPPT 제어를 통해 태양전지의 최대전력을 얻음과 동시에 역률은 0.99 이상, THD는 5[%] 이내로 IEEE 표준규격 및 한전배전계통공급기준에 만족함을 알 수 있다.

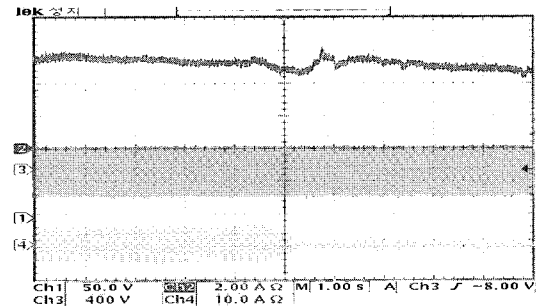
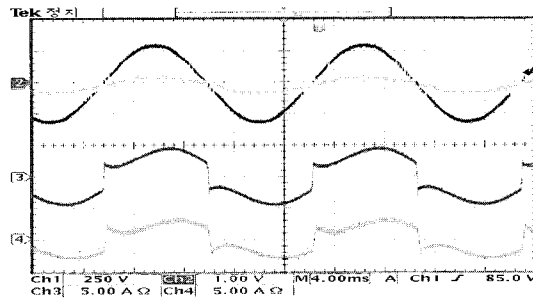
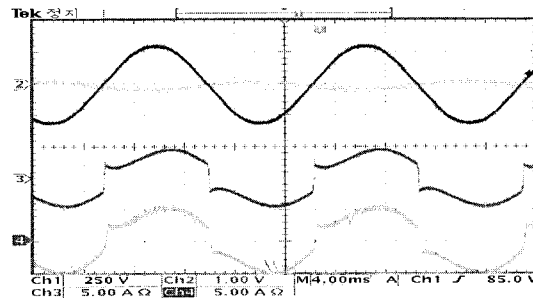


그림 12 제안된 시스템의 일사량 감소 시 MPPT 실험결과
Fig. 12 Experimental result of proposed system at decreasing insolation



(a) S=470(W/m²)



(b) S=930(W/m²)

그림 11 제안된 시스템의 주간모드 시 실험결과(비선형 부하)
Fig. 11 Experimental results of proposed system at sunny mode(nonlinear load condition)

그림 12는 일사량이 급격하게 감소할 때의 제안된 시스템의 시스템 응답 파형으로 위로부터 태양전지 전압(CH1) 및 전류(CH2), 인버터 출력전압(CH3) 및 전류(CH4)이다. 그림 12에서처럼 제안된 시스템은 태양 전지의 전압과 전류를 측정하여 일사량이 변동할 시 빠른 시간 안에 안정적으로 최대전력점을 추종하도록 동작함을 확인 할 수 있다.

4. 결 론

본 연구에서는 기존의 계통연계형 태양광 발전시스템에 추가적인 장치 없이 MPPT 제어와 고조파 감소 및 역률개선 기능을 동시에 수행할 수 있는 전력품질 개선기능을 갖는 계통연계형 태양광 발전시스템을 제안하였고, 부하조건과 기후변화에 따른 모드별 동작원리 및 제어 알고리즘을 이론적으로 해석하였다. 또한, 시뮬레이션과 실험을 통해 제안된 시스템이 태양광의 최대출력을 얻음과 동시에 계통의 역률개선 및 고조파 저감 기능을 수행할 수 있음을 확인하였다. 본 논문에서 얻은 결과를 요약하면 다음과 같다.

1. 제안된 시스템은 역률 부하 및 비선형 부하 조건에서 계통의 역률을 항상 0.99 이상을 유지할 수 있고, THD는 3.8[%] 이내로 저감할 수 있어 한전배전계통 공급기준 및 IEEE std-1159의 표준규격을 만족한다.

2. 제안된 시스템은 MPPT 제어를 통해 태양전지의 최대출력을 얻음과 동시에 전력품질개선 기능을 수행함으로써 기존의 시스템의 유효전력 공급 시 발생하는 역률저하 문제를 해결할 뿐 아니라 계통의 고조파도 저감시킬 수 있다.

3. 제안된 시스템은 추가적인 장치 없이 MPPT 제어와 PQC를 통합적으로 운영할 수 있어 기존의 시스템과 비교하여 소형경량화, 제어의 용이성, 설치 및 유지보수가 쉬운 장점이 있다.

이상의 결과를 종합하면 본 연구에서 제안한 전력품질개선 기능을 갖는 계통연계형 태양광 발전시스템은 역률개선, 고조파 저감 및 최대출력제어를 하나의 시스템에서 통합적으로 운영할 수 있기 때문에 실제 시스템의 설계 및 구축 그리고 보급에 유리하다. 또한, 제안된 시스템은 태양광 발전시스템 뿐 아니라 풍력 및 연료전지와 같은 신재생에너지를 이용한 계통연계형 분산전원시스템에 즉시 적용이 가능하다. 이는 하나의 시스템으로 계통의 품질 향상 및 청정에너지 사용이 가능하게 되어 에너지의 97[%]이상을 수입에 의존하는 우리나라의 에너지 수급문제에 중요한 역할을 할 것으로 기대된다.

본 연구는 산업자원부의 지원에 의하여 기초전력연구원(R-2005-7-136)주관으로 수행된 과제임.

참 고 문 헌

[1] S. Xiaofeng, W. Weiyang, L. Xin, and Z. Qinglin, "A research on photovoltaic energy controlling system with maximum power point tracking," Power conversion conference, Oskak, vol. 2, pp. 822-826, April 2002.

[2] E. A.M. Sharaf and A.R.N.M.R.U. Haque, "Low cost utility interconnected photovoltaic scheme for residential/village/ cottage electricity," Proceedings of the System Theory SSST, vol. 1, pp. 435-438, March 2005.

[3] 유권중, 정영석, 최주엽, "60Hz 절연변압기가 없는 고주파링크방식 계통연계형 태양광발전시스템 고찰," 전력전

자학회 논문지, vol. 7, no. 6, pp. 563-569. 2002년 10월

[4] J.H.R Enslin, M.S. Wolf, D.B. Snyman, and W. Sweigers, "Integrated photovoltaic maximum power point tracking converter," IEEE Trans. on Industrial Electronics, vol. 44. no. 6, pp. 769-773, Dec. 1997.

[5] 김일송, 백인철, 윤명중, "계통연계형 태양광 발전시스템의 태양전지 전류추정을 위한 슬라이딩 모드 관측기 설계," 전력전자학회 논문지, vol. 10, no. 4, pp. 411-419. 2005년 8월.

[6] 유권중, 최주엽, "태양광발전시스템에서의 전력전자기술," 전력전자학회지, vol. 8, no. 4, pp. 26-29, 2003. 8

[7] IEEE Std 1159-1995, "IEEE Recommended Practice for Monitoring Electric Power Quality," IEEE standards board, June 1995.

[8] S.J. Chiang, K.T. Chang, and C.Y. Yen, "Residential energy storage system," IEEE Trans. on Industrial Electronics, vol. 45, no. 3, pp. 385-394, June 1998.

[9] Y.C. Kuo, T.J. Liang, and J.F. Chen, "Novel Maximum-Power-Point-Tracking Controller for Photovoltaic Energy Conversion System," IEEE Trans. on Industrial Electronics, vol. 48, no. 3, pp. 594-601, June 2001.

[10] S.H. Ko, S.R. Lee, H. Dehbonei, and C.V nayar, "Application of Voltage- and Current-Controlled Voltage Source Inverters for Distributed Generation Systems," IEEE Trans. on Energy Conversion, vol. 21, no. 3 pp. 782-792, Sept. 2006.

[11] B.K. Vose, P.M. Szczeny, and R.L. Steigerwald, "Microcomputer control of a residential photovoltaic power conditioning system," IEEE Trans. on Industrial Application, vol. IA-21, pp. 1182-1191, Sept/Oct. 1985.

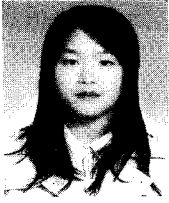
[12] S.H. Ko, Y.C. Shin, and S.R. Lee, "Implementation of Grid-interactive Current Controlled Voltage Source Inverter for Power Conditioning System," KIEE International Trans. on Electrical Machinery and Energy Conversion Systems, vol. 5-B, no. 4, pp. 382-391, 2005.

저 자 소 개



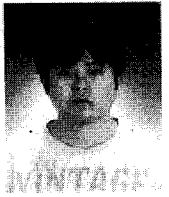
고성훈(高晟勳)

1972년 6월 1일생. 1998년 군산대 공대 제어계측공학과 졸업. 2000년 동 대학원 전자공학과 졸업(석사). 2007년 동 대학원 전자정보공학부 졸업(공학박). 2004년~2005년 호주 Curtin University of Technology. visiting research fellow. 2007년~현재 전북대 BK21-전북 전자정보 고급인력양성사업단 박사후연구원.



조아란(趙雅蘭)

1981년 11월 11일생. 2005년 군산대 공대 전자정보공학부 졸업. 2007년 동 대학원 전자정보공학부 졸업(석사). 2007년 현재 군산대 공대 전자정보공학부 조교.



강대업(姜大業)

1980년 8월 13일생. 2006년 군산대 공대 전자정보공학부 졸업. 2006년~현재 동 대학원 전자정보공학부 석사과정.



박천성(朴天成)

1980년 3월 15일생. 2006년 군산대 공대 전자정보공학부 졸업. 2006년~현재 동 대학원 전자정보공학부 석사과정.



전칠환(全七煥)

1955년 6월 2일생. 1980년 서울대 공대 전기공학과 졸업. 1986년 미국밴더빌트대학교 대학원 전기공학과 졸업(석사) 1990년 동 대학원 전기공학과 졸업(공박), 1990년~현재 군산대 전자정보공학부 교수.



이성룡(李星龍)

1958년 11월 30일생. 1980년 명지대 공대 전기공학과 졸업. 1982년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1988년 전북대 대학원 전기공학과 졸업(공박). 1997년~1998년 Virginia Tech. visiting professor. 2003년~2005년 호주 Curtin University of Technology. visiting professor. 1990년~현재 군산대 전자정보공학부 교수.