

RTDS 시험모듈을 이용한 태양광 인버터의 성능시험에 관한 연구

論 文
56-2-15

A Study on Performance Test of a Photovoltaic System Inverter using Real Time Digital Simulator (RTDS)

金 應 想[†] · 金 슬 기^{**} · 全 鎮 洪^{**} · 安 鍾 普^{*}
(Eung-Sang Kim · Seul-Ki Kim · Jin-Hong Jeon · Jong-Bo Ahn)

Abstract - A PV system inverter test module using RTDS was developed and performance test of a commercial PV inverter was carried out. The developed module consists of one RTDS hardware rack, RTDS software models representing PV array and simple distribution system, and two power amplifiers that was specifically designed for generating power corresponding to signals from RTDS. Performance test results verified effectiveness and reliability of the test module. It is expected that the developed test module may help PV inverter manufacturers improve and test their systems in the developing stage.

Key Words : PV Inverter, Performance Test, RTDS, Power Amplifier

1. 서 론

태양광발전시스템은 적용형태에 따라 크게 독립형과 계통 연계형으로 구분되며, 독립형의 경우 태양 빛이 없어 발전되지 않는 심야에 사용하고자 전력을 저장할 수 있는 축전지 등 저장시스템이 필요하기 때문에 주로 계통연계형이 많이 적용되고 있는 형편이다. 계통연계형 태양광발전시스템은 직류전력을 발생시키는 태양전지 모듈, 발전된 직류전력을 계통과 연계시키고 부하에 교류전력을 공급하도록 교류로 변환 시키는 인버터 및 계통과의 원만한 연계운전을 위한 연계장치로 구성되어 있다. 이 중 인버터 및 내부의 일부 제어 장치를 개발단계에서 실시간으로 다양한 시험의 반복 수행을 통해서 우수한 성능의 제어장치 개발이 가능 하므로 본 논문에서와 같은 실시간 시험모듈 및 시험장치의 개발이 필요한 실정이다.

본 논문에서는 태양전지의 수학적인 모델링을 토대로 전력시스템 상용 해석도구인 실시간 디지털 시뮬레이터 (Real Time Digital Simulator, 이하 RTDS)[1,2]를 활용하여 태양전지 시험모듈 및 소규모 배전계통 시험모듈을 개발하고 피 시험기기와의 상호연계를 위한 전력증폭기를 개발하여 기존 실 계통에 적용되고 있는 상용제품을 대상으로 실 계통연계 시험을 수행하고자 한다. 본 논문에서와 같이 개발된 계통연계 시험장치를 활용하여 실계통에서 적용되고 있는 상용 인버터의 성능시험을 통해서 개발된 계통연계 시험 모듈 및 장치의 성능 확인 및 신뢰성을 입증받고자 하며, 성공적으로 개발되면 태양광발전시스템용 인버터 및 제어장치의 개발에

는 물론이거니와 다른 분산전원의 구성요소 기술개발 및 성능을 향상시키는데 크게 기여할 것으로 기대된다.

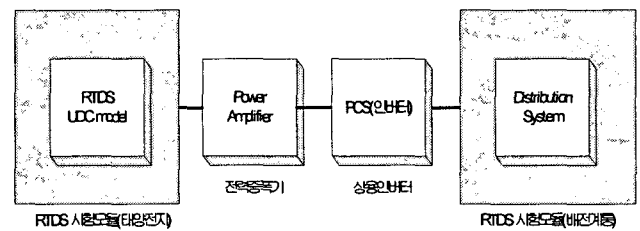


그림 1 태양광 인버터 계통연계 시험장치 구성도
Fig. 1 Configuration of grid interface test module of PV inverter

2. 계통연계 시험 장치 구성

그림 1은 RTDS를 이용한 분산전원 계통연계 시험 장치 구성도이다. 그림에서 좌측의 RTDS는 태양전지 시뮬레이터의 개념으로 태양전지를 수학적으로 모델링 하고 모델링 된 데이터를 UDC(User Defined Component)모델로 개발하여 RTDS에 로딩 시킨 결과라고 볼 수 있다. 두 번째 전력증폭기는 태양전지 어레이 모듈인 RTDS에서 발생하는 신호를 실제 태양전지 어레이에서 전력이 발생하는 것과 마찬가지로 실제 전력을 만들어 주기 위한 신호 증폭기이다. 또한 세 번째는 본 시험장치를 활용하여 시험하고자 하는 피 시험용 인버터이다. 본 논문에서는 국내 현장에서 적용되고 있는 모 회사의 10kVA 상용인버터를 수정하지 않고 그대로 활용하고자 한다. 마지막으로 실제 계통과 연계시험도 가능 하지만 본 논문에서는 시험용으로 배전계통을 RTDS 시뮬레이터에 모의 구성한 시뮬레이터이다. 예비시험에서는 각 시험장치

[†] 교신저자, 正會員 : 韓國電氣研究院 責任研究員
E-mail : eskim@keri.re.kr

^{*} 正會員 : 韓國電氣研究院 責任研究員

^{**} 正會員 : 韓國電氣研究院 先任研究員

接受日字 : 2006年 9月 20日

最終完了 : 2006年 12月 16日

부분에 대한 성능을 시험하고자 우측 배전계통 모듈은 실제 배전계통으로도 체크하지만 전체적인 시험을 수행시에는 배전계통 RTDS 시뮬레이터를 적용하기 위해서이다.

3. 태양전지 RTDS 시험모듈 개발

태양전지 시험모듈을 개발하고자 적용하고자 하는 실제 태양전지의 특성을 수학적으로 모델링[3] 하고 모델링 된 자료를 RTDS용 RSCAD 프로그램을 활용하여 코딩 한 후 RTDS용 UDC 모델로 개발하여 RTDS에 로딩 시킨다.

3.1. 태양전지 모델링

태양전지 어레이는 태양광발전시스템의 에너지원으로서 시스템 구성 시 근본적인 파라미터와 제어방식에 결정적인 영향을 미친다. 전기시스템 모델링 관점에서 태양전지 어레이의 출력단자의 특성, 즉 V-I 및 P-V 곡선이 표현되어야 하며, 태양전지 모델링의 주요 대상이라고 할 수 있다. 비교적 적용이 간단하면서도 실제의 태양전지와 상당히 유사한 출력특성을 구현할 수 있는 간략화 된 등가회로 모델[3,4,5]을 사용한다. 그림 2는 태양전지 모듈의 등가회로를 보여주며, 이는 이상적인 전류원과 이에 다이오드가 병렬로 연결되고, 직렬저항이 삽입된 회로가 된다. 등가회로 모형에서 식 (1)과 같은 수리 관계식을 얻을 수 있다.

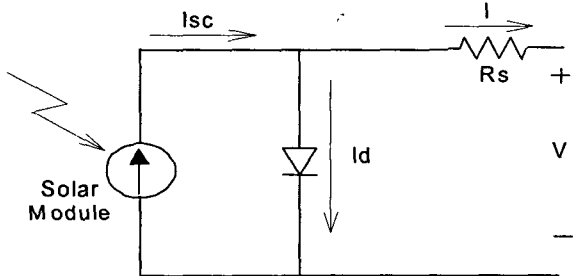


그림 2 태양전지 모듈의 등가회로
Fig. 2 Equivalent circuit of a PV module

$$I = I_{SC} - I_0 \left(\exp \left[\frac{V + IR_S}{nV_T} \right] - 1 \right) \quad (1)$$

- 단, I_{SC} = 태양전지 단락전류 [A]
- I_D = 다이오드 전류 [A]
- I_0 = 다이오드 포화전류 [A]
- V = 측정된 단자전압 [V]
- R_S = 직렬저항 [Ω]
- n = 다이오드 이상정수 (1~2)
- V_T = 열 전위차 [V]. 단, $V_T = m \cdot (kT/q)$
- k = 볼츠만 상수 (1.38e-23 [J/K])
- T = 절대온도 [K]
- q = 쿨롱 상수 (1.6e-19 [C])
- m = 태양전지 모듈 내의 셀(cell) 수

태양전지 모듈의 파라미터는 제조업체가 제공하는 데이터에서 얻을 수 있으며, 일부 파라미터는 태양전지의 기타 특성식 (2)-(5)의 수식적인 조작을 통하여 추정할 수 있다[6,7].

$$I_{SC} = I_{SC(ref)} \left(\frac{S}{1000} \right) + J(T - T_{ref}) \quad (2)$$

$$I_0(ref) \approx I_{SC(ref)} \cdot \exp \left[-\frac{V_{OC(ref)}}{nV_T} \right] \quad (3)$$

$$I_0 = AT^y \exp \left[\frac{-E_g}{nkT} \right] \quad (4)$$

$$E_g = 1.16 - 7.02 \times 10^{-4} \frac{T^2}{T - 1108} [eV] \quad (5)$$

- 단, T_{ref} = 기준온도 (=298 [K])
- $I_{SC(ref)}$ = 기준온도에서의 단락전류 [A]
- S = 일사량 [W/m²]
- J = 단락전류 온도계수 [A/K]
- V_{OC} = 태양전지 개방전압 [V]
- A = 포화전류 온도계수 [A/K]
- y = 온도의존 인자
- E_g = band 에너지 갭 [eV], 1 eV = 1.6e-19 Joul

여러 개의 태양전지 모듈이 직병렬로 연결되어 적절한 출력을 갖는 어레이를 구성한다. N_S (직렬 수) \times N_P (병렬 수)의 태양전지 모듈로 구성된 태양전지 어레이의 출력전류 I_A 는 식 (6)과 같이 나타낼 수 있다[6, 7].

$$I_A = N_P I_{SCA} - N_P I_0 \left(e^{\frac{V_A + I_A R_{SA}}{nN_S V_T}} - 1 \right) \quad (6)$$

여기서, 어레이 단락전류 $I_{SCA} = N_P I_{SC}$, 어레이 단자전압 $V_A = N_S V$ 그리고 어레이 직렬저항 $R_{SA} = (N_S/N_P)R_S$

3.2. RTDS 시험모듈 개발

3.1의 태양전지 모델링에서 기술한 특성 관계식을 바탕으로 RTDS의 사용자 정의 기능을 사용하여 태양전지 어레이 UDC(User Defined Component) 모델을 개발하였다. 표 1은 태양전지 어레이 모델에 입력해야 하는 파라미터를 나타낸다. 그림 3은 개발한 태양전지 어레이 RTDS 모델이다. 일사량과 태양전지 표면온도를 입력받게 되어 있으므로 원하는 임의의 외부조건을 인가해 준다. 이 모델을 클릭하면 어레이 파라미터 및 관련 데이터를 입력하기 위한 입력창이 생성된다. 그림 4는 어레이를 구성하는 태양전지 모듈의 데이터를 입력하는 창이다. 그림 5는 모듈 내 태양전지 직렬연결 수, 모듈의 직병렬 연결 수를 입력하는 창이며, 그림 6은 모듈 내부에서 출력변수 계산에 사용되는 기준정수 입력 부분이다. 그림 7 및 8은 각각 어레이 모델 내부에서 계산된 변수들을 출력할 것인가를 선택하는 창과 선택된 변수들에 대한 변수 명을 입력하는 창이다. 그림 9는 개발된 모듈을 로딩한 RTDS 실제 사진이다.

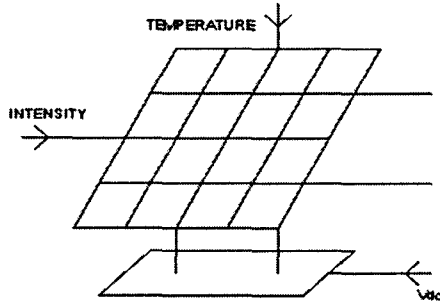


그림 3 PV 어레이 RTDS 모델
Fig. 3 RTDS model of a PV array

keri_PV_ARRAY					
INTERNAL PLOT SIGNAL NAMES		INTERNAL PLOT SELECTIONS			
REFERENCE CONSTANTS		BASIC DATA - PV MODULE			
BASIC DATA - PV MODULE		ARRAY CONFIGURATION			
Name	Description	Value	Unit	Min	Max
nid	Ideality Factor of PV Diode	1.5		0.	10.
gam	Temperature Dependency Factor	9		0.	10.
Tref	Reference Temperature [C]	25	C	0.	100
Jtmp	Temperature Coefficient of Isc [%/C]	0.065		0.	1
INSref	Reference Solar Intensity [W/m2]	1000		0.	10000

그림 6 PV 어레이 기준정수 입력 창
Fig. 6 Reference parameter of PV array

keri_PV_ARRAY					
INTERNAL PLOT SIGNAL NAMES		INTERNAL PLOT SELECTIONS			
REFERENCE CONSTANTS		BASIC DATA - PV MODULE			
BASIC DATA - PV MODULE		ARRAY CONFIGURATION			
Name	Description	Value	Unit	Min	Max
compName	Component Name	PV_ARRAY	udc		
model1	UDC file for desp0	prvd			
loc	UDC file location				
prtp	Type of Processor Card	3PC			
note					
rpm	Assignment of Model to RPC Proc	Auth...			
CARD	If Manual, Begin on RPC Card	1		1 to 5	1 to 6
Rproc	If Manual, Begin on RPC Processor	8		3	1
Auto	If Auto, Begin on a RPC Processor	ENTER		0	2
Vocref	Open Circuit Voltage [V]	21.7	V	0.	100
Iscref	Short Circuit Current [A]	3.35	A	0.	100
Vmpref	Voltage at Pmax [V]	17.4	V	0.	30
Impref	Current at Pmax [A]	3.05	A	0.	10
Pmax	Maximum Power [W]	53	W	0.	200

그림 4 PV 어레이 기본 데이터 입력 창
Fig. 4 Basic data of PV array

keri_PV_ARRAY					
INTERNAL PLOT SIGNAL NAMES		INTERNAL PLOT SELECTIONS			
REFERENCE CONSTANTS		BASIC DATA - PV MODULE			
BASIC DATA - PV MODULE		ARRAY CONFIGURATION			
Name	Description	Value	Unit	Min	Max
pIo	Plot Saturation Current of Array [A]	Y...		0	1
pRsA	Plot Series Resistance of Array [ohm]	Y...		0	1
pIoref	Plot Saturation Current of Module at Tref [A]	Y...		0	1
pIscA	Plot Short Circuit Current of Array [A]	Y...		0	1
pAt	Plot Temperature Constant of Io	Y...		0	1
pEg	Plot Band Energy Gap [eV]	Y...		0	1
pVocA	Plot Open Circuit Voltage of Array [V]	Y...		0	1
pVsA	Plot Terminal Voltage of Array [V]	Y...		0	1
pIsA	Plot Output Current of Array [A]	Y...		0	1
pPsA	Plot Power of PV Array [kW]	Y...		0	1

그림 7 PV 어레이 내부변수 출력선택 창
Fig. 7 Options for internal output variables

keri_PV_ARRAY					
INTERNAL PLOT SIGNAL NAMES		INTERNAL PLOT SELECTIONS			
REFERENCE CONSTANTS		BASIC DATA - PV MODULE			
BASIC DATA - PV MODULE		ARRAY CONFIGURATION			
Name	Description	Value	Unit	Min	Max
Ns	Series Module Number	20		0.	100
Np	Parallel Module Number	9		0.	100
Nc	PV Cells in Each Module	35		0.	100

그림 5 PV 어레이 구성 데이터 입력 창
Fig. 5 Configuration data of PV array

keri_PV_ARRAY					
INTERNAL PLOT SIGNAL NAMES		INTERNAL PLOT SELECTIONS			
REFERENCE CONSTANTS		BASIC DATA - PV MODULE			
BASIC DATA - PV MODULE		ARRAY CONFIGURATION			
Name	Description	Value	Unit	Min	Max
nIo	Saturation Current of Array [A] Name	Io		0	0
nRsA	Series Resistance of Array [ohm] Name	RsA		0	0
nIoref	Saturation Current of Module at Tref [A] Name	Ioref		0	0
nIscA	Short Circuit Current of Array [A] Name	IscA		0	0
nAt	Temperature Constant of Io Name	At		0	0
nEg	Band Energy Gap [eV] Name	Eg		0	0
nVocA	Open Circuit Voltage of Array [V] Name	VocA		0	0
nVsA	Terminal Voltage of Array [V] Name	VsA		0	0
nIsA	Output Current of Array [A] Name	IsA		0	0
nPsA	Power of PV Array [kW] Name	PsA		0	0

그림 8 출력 내부 변수명 입력 창
Fig. 8 Internal output variables

4. 전력증폭기

태양전지 어레이 시뮬레이터에서 전력증폭기는 RTDS에서 만들어진 신호를 실제 에너지를 가지는 전압 및 전류 파형을 만들어 내는 기능을 하며, 본 연구를 위하여 설계 및 제작하였다. 전력증폭기 시스템 구성은 그림 10과 같다. 필

요한 에너지를 만들어 내기 위한 AC/DC 인버터로 이루어진 전원부와 입력 파형을 발생시키는 신호 구현부분인 DC/DC 컨버터로 구성하였으며, 이 두 부분은 dc 링크로 연결되어 있다. 전력증폭기의 제어기는 시스템이 적절한 에너지를 발생시킬 수 있도록 하는 기능과 입력된 신호를 적절한 크기의 전압과 전류로 발생시키는 기능을 한다.



그림 9 실시간 디지털 시뮬레이터(RTDS)
Fig. 9 Real time digital simulator (RTDS)

표 1 태양전지 어레이 모델의 입력 데이터
Table 1 Parameters of PV array model

구분	데이터	기호
태양전지 모듈 데이터 (단, 기준온도 및 일사량 조건)	개방전압 [V]	Vocref
	단락전류 [A]	Iscref
	최대출력점 전압 [V]	Vmpref
	최대출력점 전류 [A]	Impref
	최대출력 [W]	Pmax
	어레이 구성 데이터	모듈의 직렬 연결 수
	모듈의 병렬 연결 수	Np
	모듈 내 전지 수	Nc
기준 정수 데이터	이상정수	nid
	온도의존 계수	gam
	기준온도 [°C]	Tref
	기준 일사량 [W/m ²]	INSref
	단락전류 온도계수 [%/°C]	Jtmp

그림 11은 실제 제작된 용량 50kVA의 전력증폭기 사진이며, 그림 12는 태양전지 시뮬레이터 개발을 위하여 제작한 전력증폭기의 회로도를 나타낸다. AC/DC 컨버터는 IGBT를 이용한 승압형 PWM 정류기로서 전력증폭기 시스템 출력부가 RTDS에서 연산된 PV 어레이의 출력을 내도록 하기 위한 적절한 전력을 공급하는 기능을 한다. 증폭기 시스템 출력부에서 발생한 전압이 부하(저항 또는 태양광 인버터)에 인가되면 부하에 전류가 흐르면서 에너지를 공급하게 되고, 충분한 에너지가 공급되지 않으면 증폭기는 설정된 전압을 인가하지 못한다. 따라서 증폭기가 정확한 PV 어레이 모델의 출력전압을 내기 위해서는 해당되는 만큼의 충분한 에너지를 계통전원으로부터 공급할 수 있는 장치가 필요하다. 스위칭 주파수는 10kHz, 스위칭 방식은 공간벡터 PWM[6]을 적용하였다. 입력전원은 3상 3선의 380V 계통전원을 사용하며 정격용량은 10kVA이다. 출력측 DC-DC 컨버터는 IGBT

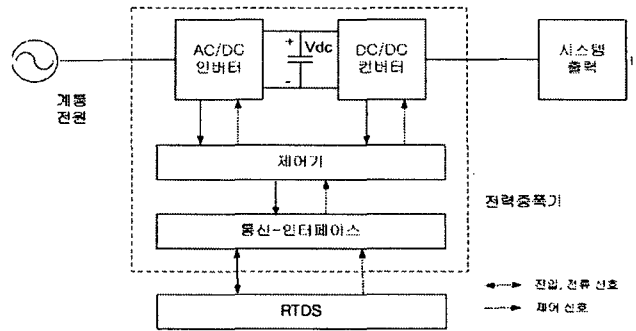


그림 10 전력증폭기 구성도
Fig. 10 System configuration of power amplifier

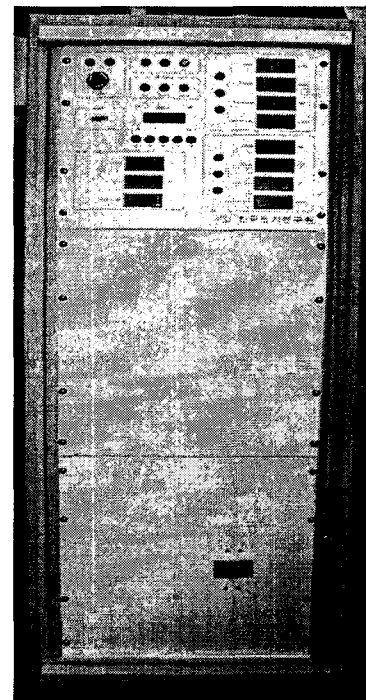


그림 11 전력증폭기
Fig. 11 Power amplifier

스위칭 소자를 사용한 Buck 컨버터로 구성되었으며, RTDS에서 설정된 PV 어레이 출력전압을 내도록 하는 전압제어기의 역할을 한다. 스위칭 주파수는 10kHz, 스위칭 방식은 PWM을 적용하였다. 입력 전원은 계통연계 PWM 컨버터의 출력인 DC Link 전압으로 650V~750V를 사용하며 현재 시스템의 설정 값은 675V이다. Buck 컨버터의 출력 전압 범위는 0V~500V이며 전류는 최대 35A로 설정되어 있다. Buck 컨버터를 적용하였기 때문에 시스템의 출력전류 방향은 단방향이다.

태양전지 시뮬레이터에서 전력증폭기는 RTDS에서 연산된 PV 어레이 모델의 출력을 실제 에너지 수준으로 정확하게 구현하는 역할을 하기 때문에, 외란에 대해서 충분히 빠른 응답특성과 안정적인 제어성을 가져야 한다. 그림 13과 14는 시스템 출력부에 정격 저항부하 15Ω를 인가와 탈락 시 증폭기의 응답특성을 보인 것이다. 출력전압 V_p와 출력전류 I_p의 응답속도가 대략 50-100ms의 시간대를 가진다.

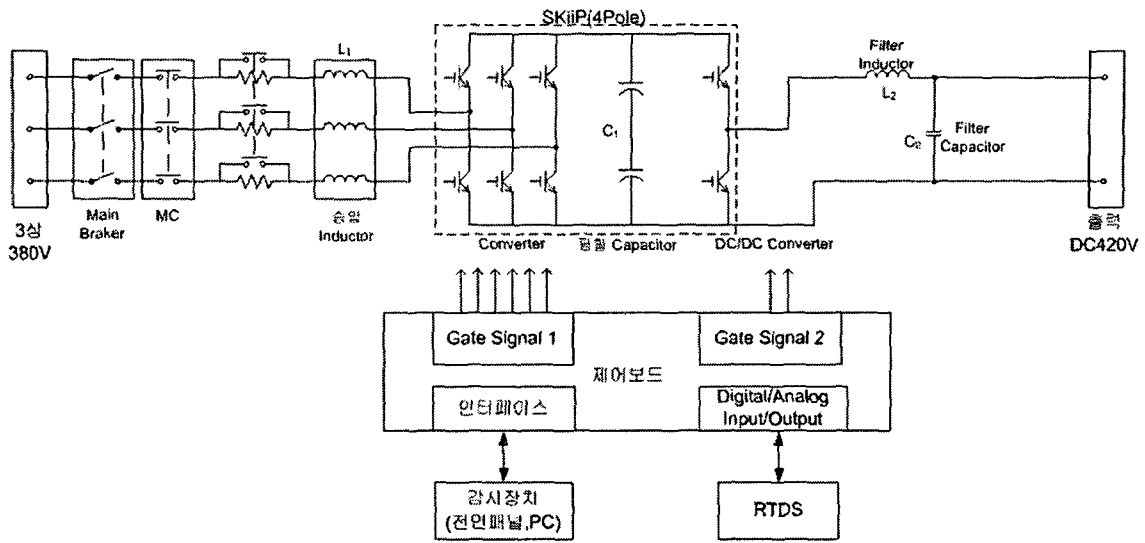


그림 12 전력증폭기 회로도

Fig. 12 Circuit diagram of power amplifier

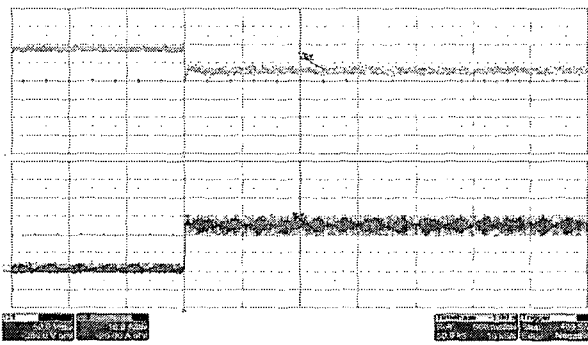


그림 13 정격부하 투입 시 증폭기 출력

Fig. 13 Power amp. performance in addition of full loading

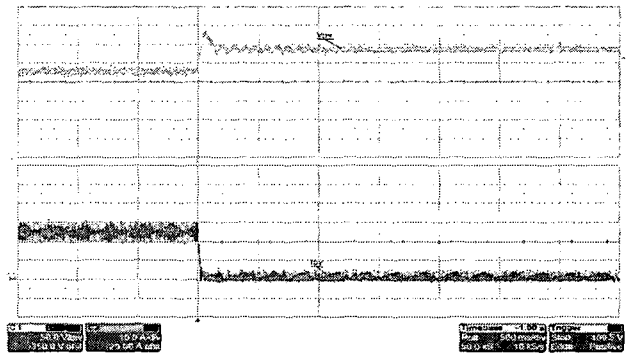


그림 14 정격부하 제거 시 증폭기 출력

Fig. 14 Power amp. performance in removal of full load

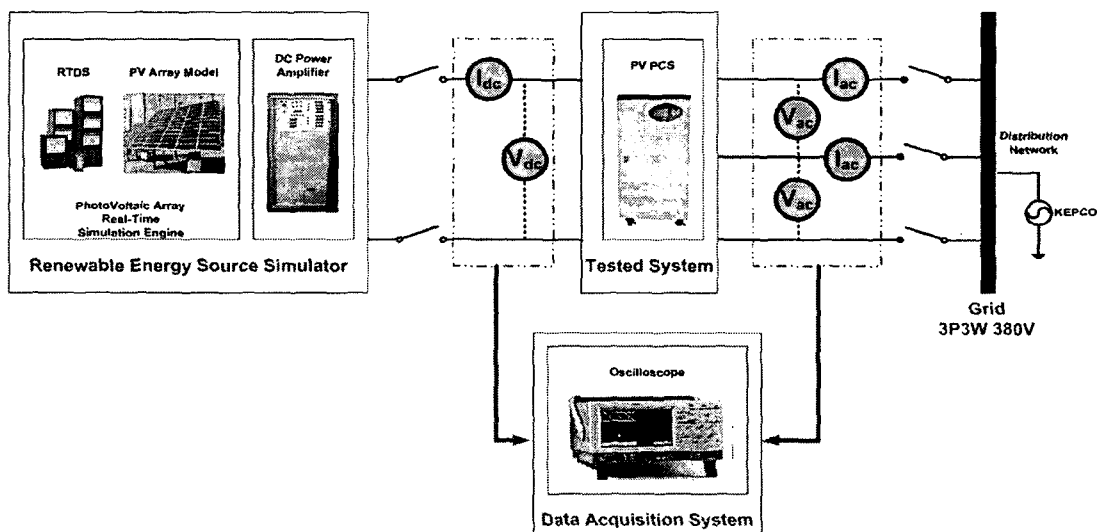


그림 15 태양광인버터 제어성능 Test Bed

Fig. 15 Test bed for control performance of PV inverter

5. 시험모듈을 이용한 상용인버터 성능 시험

5.1 기본 성능 시험

개발된 시험 모듈이 태양광 PCS와 같이 운전되어 실제 태양광 시스템과 같은 출력 특성 및 운전 제어를 가지는지를 검토하기 위하여 그림 15와 같은 Test Bed를 구성하였다. 그림 15에 제시되어 있는 Test Bed는 본 논문에서 개발된 태양광 시험모듈과 현재 시중에 시판되고 있는 모 회사의 10kW 태양광 PCS(표 2 참고) 및 데이터 측정장치로 구성되어 있다. 본 논문에서는 상용 태양광 PCS의 출력을 3상 380V의 배전계통에 연계하여 운전하였으며 입력은 실제 태양전지 어레이 대신 본 논문에서 개발된 시험 모듈을 연결하여 피시험기를 대상으로 기동특성을 체크하였다. 기동특성 결과 그림 16에서 가장 위 그림은 임의적으로 온도는 25℃에서 일사량을 700W/m²를 조사했을 경우의 일사량 표시이고, 두 번째 그림은 태양전지 어레이 출력전압, 세 번째 그림은 어레이 출력전류 그리고 네 번째 그림은 어레이 출력을 표시한다. 시험대상인 상용 PCS는 소프트 스타트되는 동안 어레이 전압이 지령치(MPPT 지령치이든 정전압 제어에 의한 지령치든)를 향해 서서히 수렴해 가고 있으며, 소프트 스타트가 완료되는 시점(그림에서 약 43초 지점)에서 급변하며 MPPT 전압지령치를 추종하고 있다.

표 2 피 시험용 상용인버터 규격
Table 2 Specification of a tested PV inverter

항목	규격
인버터형식	PWM인버터(IGBT)
정격 출력 용량	10kVA
정격 출력 전압	380V(3상4선)
정격 출력 주파수	60Hz
출력단 전류 THD	5%이내(정격부하시)
정전시 인버터 정지	600ms이내
계통전압 변동율	10%이내
효율	90%이상(100%부하시)
과부하능력	150% 1분

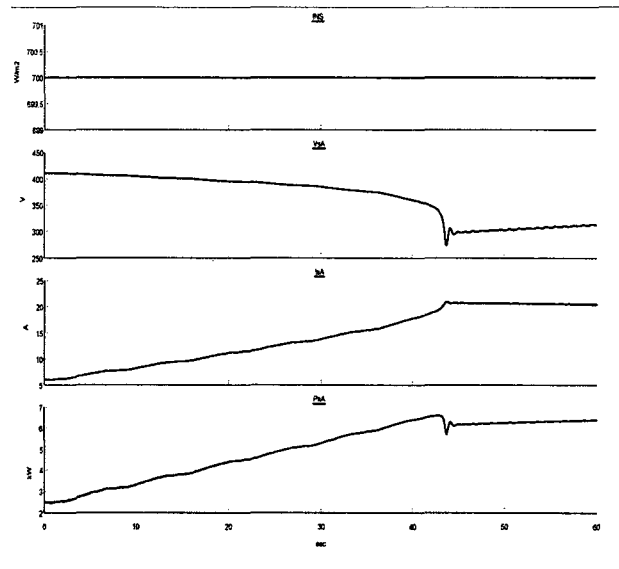


그림 16 PCS 기동 특성(S=700W/m², T=25°C)
Fig. 16 Start-up characteristics (S=700W/m², T=25°C)

5.2 운전 성능 시험

5.1의 기본 성능 시험에서는 실제 계통과 연계하여 출력 특성 시험 분석을 통해서 개발된 태양전지 시험모듈의 성능을 검증하였으며, 본 운전성능 시험에서는 그림 17과 같이 태양전지 시험모듈 및 소규모 배전계통을 RTDS모델 및 전력증폭기와 연계하여 구축한 시험장치에서 실제 운전되고 있는 상용인버터 10kVA를 피 시험기기로 하여 계통전압을 임의적으로 과전압 및 부족전압으로 만든 후 피 시험용 인버터의 보호기능 및 응답특성을 체크하였다.(그림 18, 그림 19, 그림 20 및 그림 21) 또한 계통전압을 순간정전 및 저하시키는 경우에 인버터의 응답특성을 체크하였으며(그림 22, 그림 23), 태양전지의 입력인 일사량을 변동시키는 경우에 인버터의 출력변화를 체크하였다(그림 24 및 그림 25).

본 시험용 상용인버터는 실제 현장에서 적용해도 적절하도록 제작된 인버터를 변경하지 않고 그대로 사용했기 때문에

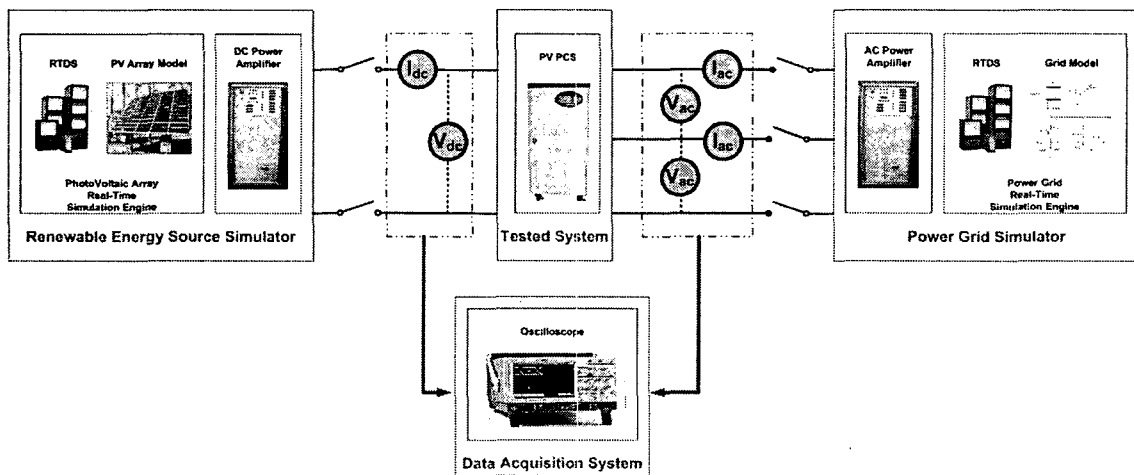


그림 17 태양광 인버터 계통연계 성능 test bed
Fig. 17 Test bed for grid interface performance of PV inverter

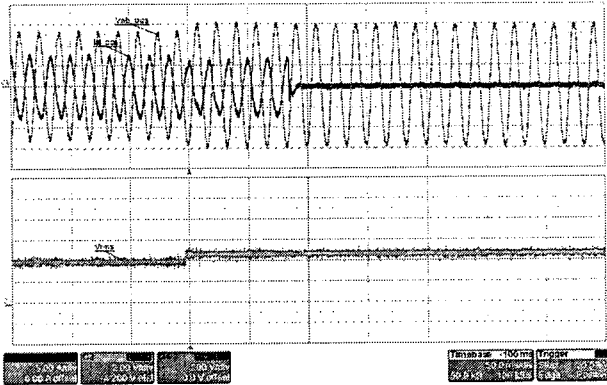


그림 18 출력과전압 보호기능 시험
Fig. 18 Overvoltage protection test

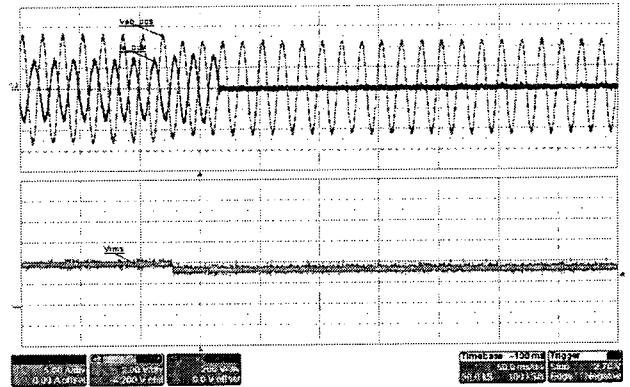


그림 19 출력부족전압 보호기능 시험
Fig. 19 Undervoltage protection test

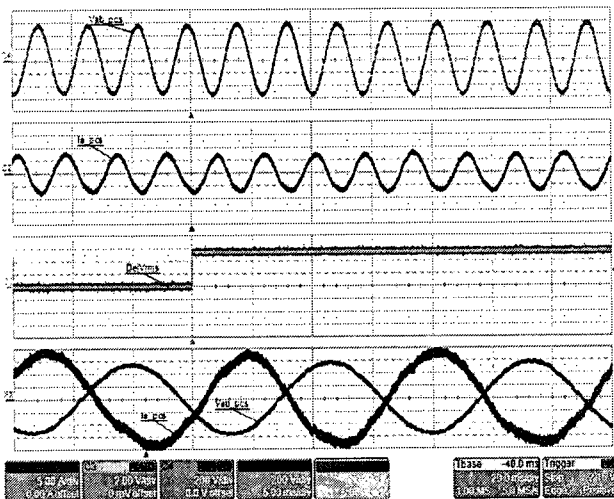


그림 20 계통전압급변시험 (+5%)
Fig. 20 Grid voltage ramp variation test (+5%)

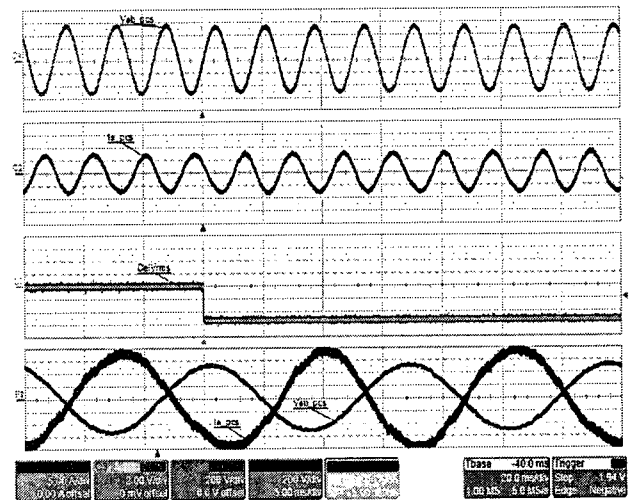


그림 21 계통전압급변시험 (-5%)
Fig. 21 Grid voltage ramp variation test (-5%)

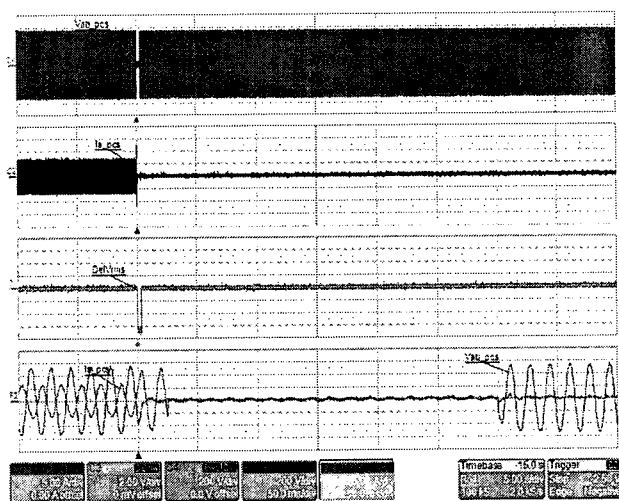


그림 22 계통전압 순간정전 시험 (0.3초 순간정전)
Fig. 22 Momentary outage test (duration of 0.3 [sec])

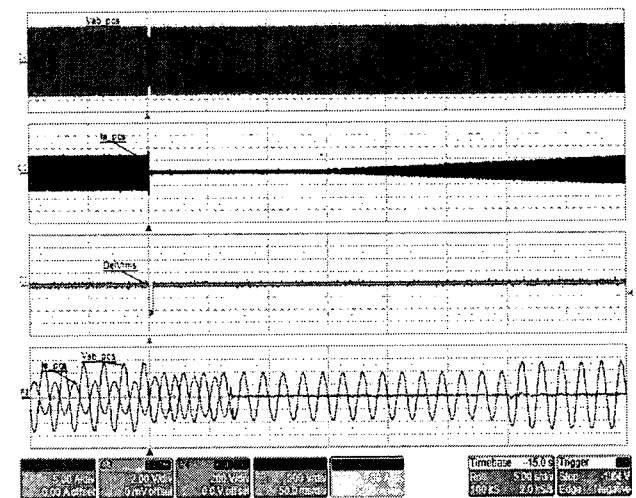


그림 23 계통전압 순간전압저하 시험 (정격의 70%)
Fig. 23 Instantaneous voltage drop test (70% of nominal voltage)

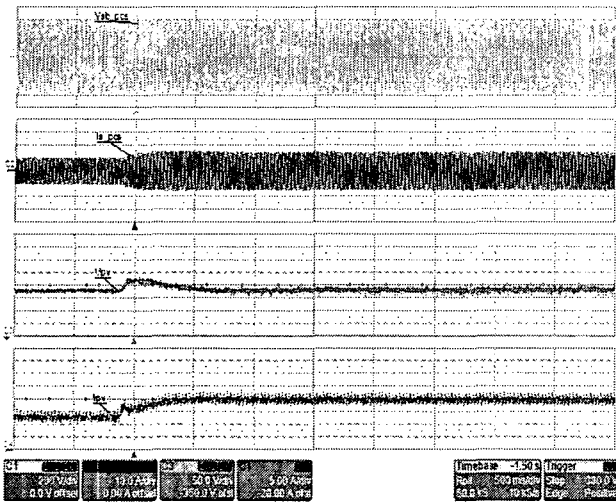


그림 24 입력전력급변 시험(일사량 500 → 750 [W/m²])
Fig. 24 Irradiance ramp variation test (500 → 750 [W/m²])

운전 성능 시험 결과에서와 같이 인버터가 갖는 보호기능 이상의 전압 변동에서는 즉시 차단되지만 입력전압 변동 허용범위 내에서는 변동순간 감지했다가 다시 정상으로 제어되는 현상을 감지할 수 있다. 정전시험에서는 인버터가 바로 차단되지만 저하시험에서는 일정시간이 지나면 다시 정상으로 복구되는 것을 알 수가 있다. 또한 태양전지 모듈의 입력인 일사량을 임의적으로 변동시켰을 경우도 마찬가지로 변동순간은 제어기의 특성에 약간 진동이 있지만 제어기가 정상적으로 작동되는 경우에는 정확한 출력이 나오는 것을 알 수 있었다. 결과적으로 상용인버터의 보호기능이 제대로 되어 있는 것과 동시에 본 논문에서 개발된 시험모듈의 성능을 동시에 입증할 수 있었다.

그림 18은 출력과전압 보호기능 시험결과이다. 위의 그래프는 인버터 출력전압(Vab_pcs)과 출력전류(Ia_pcs)의 전압파형이고, 아래 그래프는 계통전압 실효치(Vrms)이다. 계통전압을 220V에서 245V로 인가했을 때 인버터는 이를 과전압으로 감지하고 약 0.1초 후에 계통으로부터 차단되었다. 그림 19는 출력부족전압 보호기능 시험결과이다. 위의 그래프는 인버터 출력전압(Vab_pcs)과 출력전류(Ia_pcs)의 전압파형이고, 아래 그래프는 출력전압 실효치(Vrms)이다. 계통전압을 220V에서 190V로 인가했을 때 인버터는 이를 부족전압으로 감지하고 약 0.05초 후에 차단되었다.

그림 20은 계통전압을 5% 상승시킨 급변시험에 대한 시험결과이다. 위에서부터 전압파형(Vab_pcs), 전류파형(Ia_pcs), 계통전압 실효치 변동(DelVrms)을 나타내고, 마지막 그래프는 전압파형과 전류파형을 확대한 것이다. 계통전압이 5% 상승하는 순간 인버터 출력전압이 약간 왜곡되나 곧 안정적인 출력을 내었다. 그림 21은 계통전압을 5% 감소시킨 급변 시험에 대한 시험결과이다. 그림 20과 동일하게 전압파형, 전류파형 및 계통전압 실효치 변동, 그리고 전압파형과 전류파형에 대한 확대 그래프이다. 계통전압이 5% 강하하는 순간 인버터 출력전압이 다소 왜곡되나 곧 안정적인 출력을 내었다.

그림 22는 계통전압 순간정전 시험결과이다. 그림의 그래프는 위에서부터 전압파형(Vab_pcs), 전류파형(Ia_pcs), 계

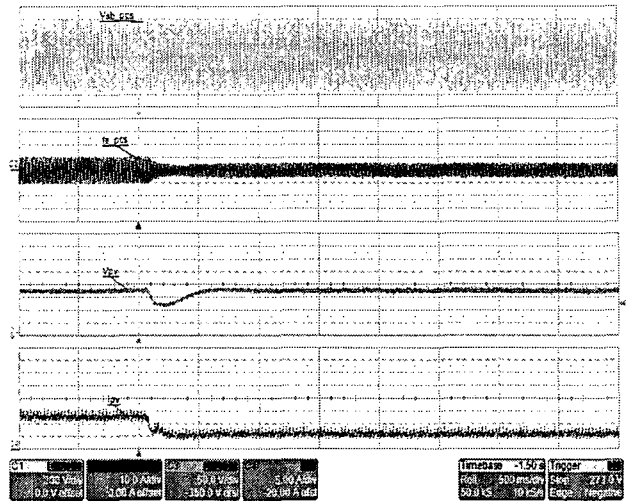


그림 25 입력전력급변 시험(일사량 500 → 250 [W/m²])
Fig. 25 Irradiance ramp variation test (500 → 250 [W/m²])

통전압 실효치 변동(DelVrms)을 나타내고, 마지막 그래프는 전압파형과 전류파형을 확대한 것이다. 계통전압을 0.3초간 순간정전(정격전압의 0% 인가)을 일으키고 나서 복구시켰으며, 이 때 인버터는 약 1.5 주기 내에 바로 차단되었다. 그림 23은 계통전압 순간저하 시험결과이다. 그래프의 구성은 그림 22와 동일하다. 계통전압을 정격전압 70%로 0.3초간 인가 후 바로 정격전압으로 올렸을 때, 인버터는 약 4 주기 후에 바로 차단되었으며, 계통전압이 정격전압으로 복구되고 나서 다시 기동을 시작하였다.

그림 24는 입력전력급변 시험으로 일사량을 상승시켰을 때의 시험결과이다. 그림은 위에서부터 각각 인버터 전압파형(Vab_pcs), 인버터 전류파형(Ia_pcs), 태양전지 어레이 전압(Vpv), 및 어레이 전류(Ipv)를 도시하였다. 일사량을 500 [W/m²]에서 700[W/m²]으로 인가했을 때, 어레이 전압은 새로운 MPPT 지점을 찾아가고 어레이 전류는 증가하여 출력이 증가하였다. 인버터는 안정적인 운전을 계속하였다. 그림 25는 입력전력급변 시험으로 일사량을 강하시켰을 때의 시험결과이다. 도시한 파라미터는 그림 24와 동일하다. 일사량을 500 [W/m²]에서 700[W/m²]으로 강하시켰을 때, 어레이 전압은 새로운 MPPT 지점을 찾아가고 어레이전류는 증가하여 전체적인 출력이 증가하였다. 인버터는 안정적인 운전을 지속하였다.

6. 결 론

본 논문에서는 전력시스템 상용 해석도구인 실시간 디지털 시뮬레이터 (RTDS)와 전력증폭기를 이용하여 태양전지 어레이의 출력특성을 재현할 수 있는 실시간 시뮬레이터를 개발하였으며, RTDS에 태양전지 어레이의 모델을 구현하고, 여기서 연산된 특성을 물리적으로 재현하기 위한 전력증폭기를 도입하였다. 또한 계통연계형으로 구성하기 위해서 RTDS에 소규모 배전계통을 모의하여 시험모듈을 포함한 계통연계 시험장치를 개발하여 기존 실 계통에 적용되고 있는 상용제품을 대상으로 실 계통연계 시험을 수행하였다. 상용제품의 성능시험을 통해서 개발된 계통연계 시험 모듈 및

장치의 성능 확인 및 신뢰성을 입증하였으며, 개발된 시험 모듈 및 시험장치는 외부 자연조건을 임의로 설정가능하며, 여러 업체에서 생산되는 다양한 태양전지의 출력특성의 구현이 가능하고 재연성을 가지므로 태양광 PCS의 개발 및 시험을 위한 장치로서 기술개발 및 성능 향상에 활용이 기대된다.

참 고 문 헌

- [1] RTDS Technologies Inc., RTDS Manual, 2002.
- [2] Manitoba HVDC Research Center, PSCAD/EMTDC User's Guide, 2003.
- [3] Minwon Park and In-Keun Yu, "A Novel Real-Time Simulation Technique of Photovoltaic Generation Systems Using RTDS", IEEE Trans. on Energy Conversion, Vol. 19, No. 1, pp. 164-169, March 2004.
- [4] L Zhang, A Al-Amoudi, Yunfei Bai, "Real-time Maximum Power Point Tracking for Grid-Connected Photovoltaic Systems", Power Electronics and Variable Speed Drives, 18-19 September 2000, Conference Publication No. 475.
- [5] S.K.Kim, E.S.Kim, "PSCAD/EMTDC를 이용한 계통연계형 태양광발전시스템의 모델링 및 모의해석", 대한전기학회 논문지 54A권 3호, 2005년 3월, pp. 107-116.
- [6] C. K. Sao, P. W. Lehn, M. R. Iravani, and J. A. Martinez, "A Benchmark System for Digital Time-Domain Simulation of a Pulse-Width-Modulated D-STATCOM", IEEE Trans. Power Delivery, Vol. 17, No. 4, October 2002, pp. 1113-1120.
- [7] Mohammad A. S. Masoum, Hooman Dehbonei, and Ewald F. Fuchs, "Theoretical and Explanation Analysis of Photovoltaic Systems With Voltage and Current Based Maximum Power-Point Tracking", IEEE Trans. on Energy Conversion, Vol. 17, No. 4, December 2002, pp. 514-522.

저 자 소 개



김 응 상(金應相)

1962년 6월 21일 생. 1988년 서울산업대 전기공학과 졸업. 1991년 숭실대학교 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1997년 동대학원 전기공학과 졸업(박사). 현재, 한국전기연구원 신재생에너지 연구그룹 책임연구원

Tel : 055-280-1330,
E-mail : eskim@keri.re.kr



김 슬 기(金슬기)

1972년 5월 7일생. 1998년 고려대학교 전기공학과 졸업. 2000년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 2000년~현재 한국전기연구원 신재생에너지 연구그룹 선임연구원.

Tel : 055-280-1332,
E-mail : blksheep@keri.re.kr



전 진 홍(全鎭洪)

1972년 12월 16일생. 1995년 성균관대학교 전기공학과 졸업. 1997년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1997년~현재 한국전기연구원 신재생에너지 연구그룹 선임연구원.

Tel : 055-280-1355,
E-mail : jhjeon@keri.re.kr



안 증 보(安鍾普)

1961년 8월 16일생. 1986년 서울대학교 전기공학과 졸업. 1995년 한국과학기술원 제어 및 자동화 설계공학과 졸업(석사). 2004년 부산대학교 전기공학과 졸업(박사). 1996년~현재 한국전기연구원 신재생에너지 연구그룹 그룹장.

Tel : 055-280-1306
E-mail : jbahn@keri.re.kr