

Performance Test of an Integrated Electronic Protection Device Based Photovoltaic Inverter

金應想[†] · 金슬기^{**} · 全鎮洪^{**} · 安鍾普^{*}
 (Eung-Sang Kim · Seul-Ki Kim · Jin-Hong Jeon · Jong-Bo Ahn)

Abstract - This paper addresses grid interconnection tests of a 3kW transformer-less photovoltaic (PV) inverter to verify the effectiveness of the PV inverter and promote its wide use. The 3kW transformer-less PV inverter, which was equipped with intelligent protection and control system, was manufactured. A hardware test bed was constructed for performance tests of the PV inverter. Control performance and grid protection tests were carried out using the test bed. Test results verify the performance of the power control and grid protection functions of the developed transformer-less PV inverter.

Key Words : PV Inverter, Performance test, Protection test

1. 서 론

에너지환경 문제 해결을 위한 노력의 일환으로 신재생에너지 전원의 개발 즉, 태양광발전시스템의 개발 및 보급이 진행 중이다. 태양광발전시스템은 햇빛을 받으면 직류전력을 발생하는 태양전지와 발생된 직류전력을 교류로 변환해서 전력을 공급해주는 전력변환장치로 크게 두 가지 요소로 구성되어 있다. 이 중에서 전력변환장치를 인버터라고 하는데, 기존에는 주로 변압기를 내장한 인버터를 적용했었다.[1] 그러나 변압기 내장형 인버터는 전기적인 절연으로 전력제어에 있어서 안정성이 강한 반면에 무게가 무겁고 부피가 크므로 저가화에 장애요인이 되고 있다. 이러한 문제점을 개선하고자 최근에는 변압기를 포함하지 않는 비절연형 태양광 인버터를 개발하여 적용하고 있다.[2] 그러나 비절연형 태양광 인버터는 소형 경량화이고 저가인 반면에 완벽한 계통보호가 우려된다.

따라서 본 논문에서는 이와 같이 전압 및 전류보호, 주파수보호, 순간정전, 순간전압 저하보호 및 단독운전 기능 등 보호기능을 통합한 지능형 보호 및 제어기를 내장한 3kW급 비절연형 태양광 인버터의 실 계통 연계시험을 통해서 지능형 보호기기의 성능 및 효율성을 입증하고 보급 확대를 도모하고자 지능형 보호 및 제어 기능을 내장한 3kW급 비절연형 태양광 인버터를 제작하고, 그 보호성능 시험을 위한 성능 시스템을 구성하여 기본성능 시험, 출력성능 시험 및 실계통 연계 보호성능 시험을 수행하여 그 결과를 토대로 비절연형 태양광 인버터의 출력 성능 및 보호기능에 대한 효율성을 입증하고자 하였다.

2. 비 절연형 태양광 인버터 및 제어기

기존의 태양광 인버터는 주로 변압기를 이용하여 인버터부와 계통선을 절연하는 형태로 전기적으로서 절연되어 있으므로 전력제어에 있어 안정성이 뛰어난 장점이 있지만 변압기로 인하여 무게가 무겁고 크기가 커지게 되므로 저가화의 장애요인이 되고 있다.[4] 그러므로 주 회로부를 변압기를 사용하지 않고 소형경량화 할 수 있는 고주파스위칭 승압용 컨버터를 채용한 비절연형의 인버터는 저가화를 도모할 수 있는 장점이 있다. 기존의 저주파 변압기를 적용한 인버터의 회로도를 그림 1에 제시하였다.

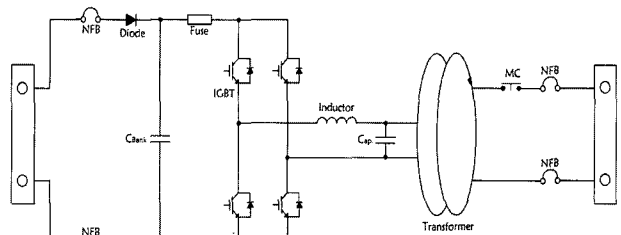


그림 1 변압기 내장형 인버터 회로도

Fig. 1 Circuit diagram of transformer-interface inverter

하지만, 승압용 컨버터를 채용한 인버터는 비 절연방식이 고, 계통에 유입되는 직류성분이 커질 우려가 있으므로 보호회로와 제어가 복잡해지게 되는 단점이 있어 이를 해결하기 위하여 전압 및 전류 보호기능, 주파수 보호기능, 순간정전 및 전압저하 보호기능 및 단독운전 보호기능을 일체화하여 내장한 지능형 보호제어기를 적용하였다. 여기서 단독운전 기능은 과거에는 주로 전압, 주파수, 위상 및 고조파 제어에 의한 수동적인 보호제어 방법을 적용하였으나 본 논문에서는 수동적인 보호제어 방법은 물론이거니와 계통연계점에서 주파수 변화에 따른 출력변화를 데드타임에 적용시켜 이 데드타임을 변동시켜 줌으로써 인버터 출력지령 전류에 의해

[†] 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 : 2007年 5月 28日

最終完了 : 2007年 7月 23日

주파수를 발산시켜 단독운전을 검출하는 샌디아 주파수 검출 능동적인 단독운전 검출방법을 동시에 내장하여 변압기 없는 인버터에 대한 보호기능을 더욱 강화시켰다. 인버터의 규격은 표 1과 같으며, 회로 및 제작 사진을 그림 2, 그림 3 및 그림 4에 제시하였다.

표 1 비 절연형 인버터 규격

Table 1 The specification of transformer-less inverter

구분	항 목	내 용
시스 템 구 성	출력 상수	단상
	태양광 입력 제어방식	MPPT
	인버터 제어방식	PWM Inverter
입력 전압	정격전압	370 [VDC]
	전압변동범위	220~430 [VDC]
출력 규격	정격 출력용량	3[kW]
	정격 출력전압	계통 전압 220[Vac]
	계통 전압변동을	±10[%] 이내
	정격출력 주파수	계통 주파수 60[Hz]
	계통 주파수 변동율	±1[Hz] 이내
	출력단 전류파형 왜율	총합 왜율 5[%]이하 각차 왜율 3[%]이하
보호 기능	입력 저전압	215[V]
	입력 과전압	451[V]
	계통전압 저전압	198[V]
	계통전압 과전압	244[V]
	Islanding 현상 보호	380[ms]

제어부의 각 회로부와 인버터의 회로부는 변압기 내장형 인버터에 사용하는 회로와 유사하므로 기존의 설계 개념을 최대한 활용하고 필요한 지능형 제어기 부분을 추가하여 설계, 제작하였다. 설계된 승압용 컨버터를 채용한 비절연형의 계통연계형 인버터의 회로도도 그림 2에 나타내었고, 그림 3은 지능형 제어기의 내부 사진이고 그림 4는 인버터의 외형 사진이다.

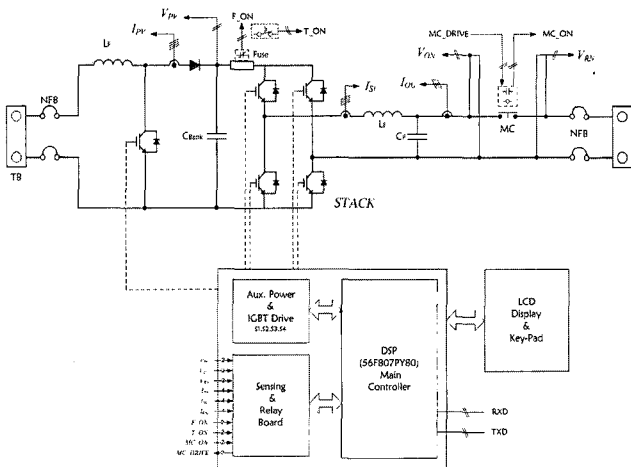


그림 2 비절연형 인버터 내부 회로도
Fig. 2 Circuit diagram of transformer-less inverter

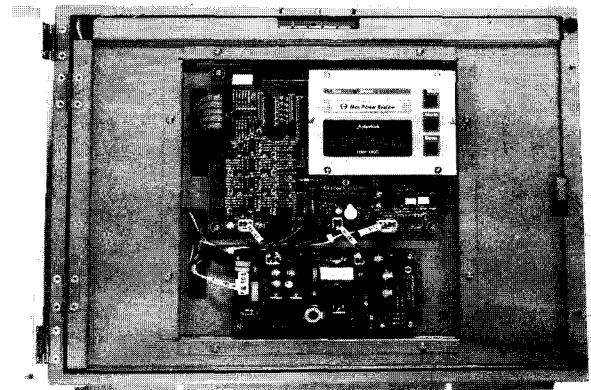


그림 3 인버터 제어기 내부 사진
Fig. 3 Inside of transformer-less inverter



그림 4 비절연형 인버터 사진
Fig. 4 Outside of transformer-less inverter

3. 출력제어 성능시험

3kW 비절연형 지능형 보호제어기 적용 인버터의 출력제어 특성을 시험하기 위하여 그림 5와 같이 출력제어 성능시험 시스템을 구성하였다.[5] 태양전지와 같은 직류 출력을 낼 수 있는 태양전지 시뮬레이터는 이미 국제적으로 상용화되고 있는 전력계통 실시간 디지털 시뮬레이터(RTDS)를 사용하여 직류를 발생하도록 하였고, 전력계통 시뮬레이터에서 발생하는 신호를 실제 전력계통과 연계할 수 있도록 이 직류전력 증폭기를 연계하였다.

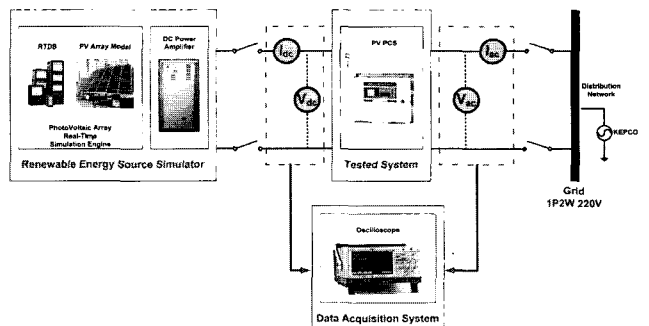


그림 5 인버터의 출력제어 성능시험 시스템 구성도
Fig. 5 Test bed for power control performance of PV inverter

여기에 개발된 비절연형 인버터 시제품을 연계하도록 하였으며, 실 계통 연계시험 시 데이터를 측정하기 위한 데이터 측정장치로 구성되어 있다. 제작된 인버터를 220V의 단상계통에 연계하여 운전하였으며, 일사량 변동에 대한 출력 제어 특성 및 역률 운전 시험을 검토하였다.

3.1 일사량 500→250 [W/m²] 급변 시 출력시험

태양전지에 대한 성능 시험은 시험실에서는 정확하게 1000[W/m²]의 광원을 조사하여 시험하지만 실제적으로 설치 현장에서는 일사량이 일조건에 따라 수시로 변동하기 때문에 일사량이 변동 시에 인버터의 출력이 제대로 동작하는지 여부를 체크하기 위해서 의도적으로 일사량을 500 [W/m²]에서 250 [W/m²]로 변동시켜 가면서 인버터의 출력 성능을 측정하였다.

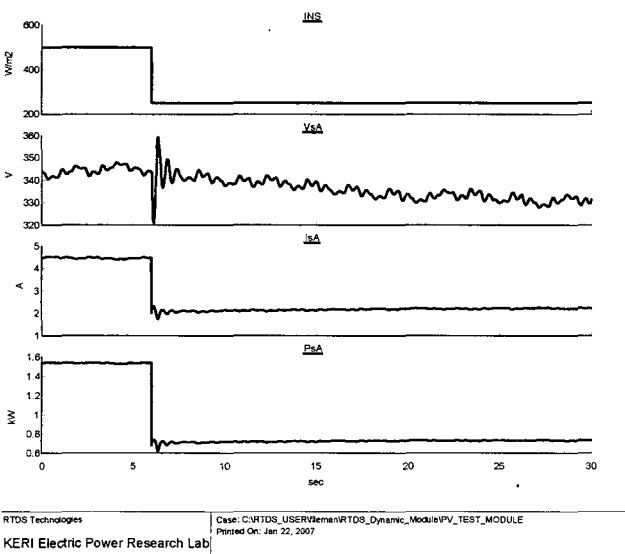


그림 6 태양전지 어레이 출력(일사량 500→250[W/m²])
Fig. 6 PV array output (irradiance 500→250[W/m²])

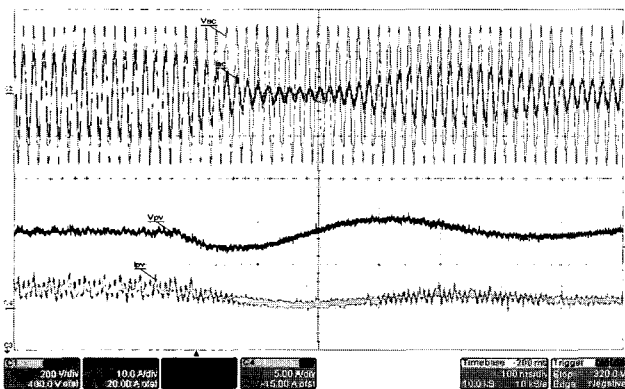


그림 7 인버터 및 태양전지 출력(일사량 500→250 [W/m²])
Fig. 7 Inverter and array output (irradiance 500→250 [W/m²])

그림 6에 일사량이 500 [W/m²]에서 250 [W/m²]로 계단 함수의 형태로 변동 시 태양전지 파라미터의 변동을 나타내었다. 그림에서 위에서부터 일사량의 세기[W/m²], 태양전지 출력전압[V], 출력전류[A] 및 출력(kW)의 그래프이다. 일사량 500 [W/m²]에서 최대점에서 운전하고 있으며, 급변 후에

도 일사량 250 [W/m²] 곡선의 최대점 근방에서 진동하다가 일정 값으로 수렴되고 있다. 그림 7은 오실로 스코프로 측정 한 파라미터를 나타내는 것으로 인버터 출력전압(Vac), 인버터 출력전류(Iac), 태양전지 어레이의 출력전압 (Vpv) 및 출력전류(Ipv)를 나타내었다.

3.2 일사량 250→500 [W/m²] 급변 시 출력시험

그림 8은 그림 6과는 반대로 일사량을 250 [W/m²]에서 500 [W/m²]로 계단함수의 형태로 증가시켰을 때의 태양전지 파라미터의 변동을 측정하였다. 그림 8에서 위에서부터 일사량의 세기, 태양전지 출력전압, 출력전류 및 출력의 그래프이다. 일사량 250 [W/m²]에서 운전하고 있으며, 급변 후에 일사량 500 [W/m²] 곡선의 최대점 근방에서 잠시 진동하다가 일정 값으로 수렴되고 있다. 그림 9는 오실로 스코프로 측정한 파라미터를 나타내는 것으로 위에서 부터 인버터 출력전압(Vac), 인버터 출력전류(Iac), 태양전지 어레이의 출력전압 (Vpv) 및 출력전류(Ipv)를 나타낸다. 이상의 결과를 통하여 비절연형 인버터의 출력제어가 일사량 변동에 응답하여 정상적으로 동작됨을 확인하였다.

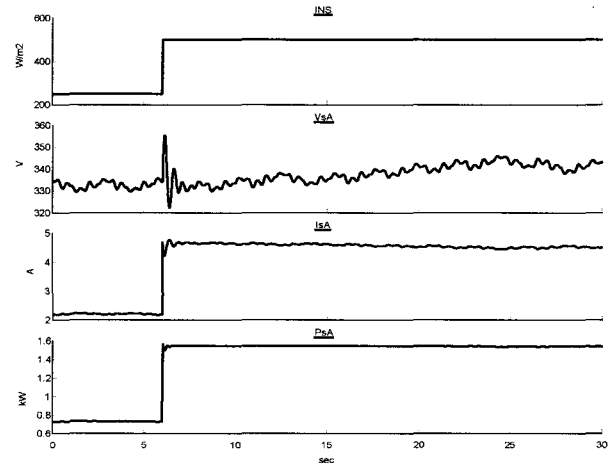


그림 8 태양전지 어레이 출력(일사량 250→500[W/m²])
Fig. 8 PV array output (irradiance 250→500[W/m²])

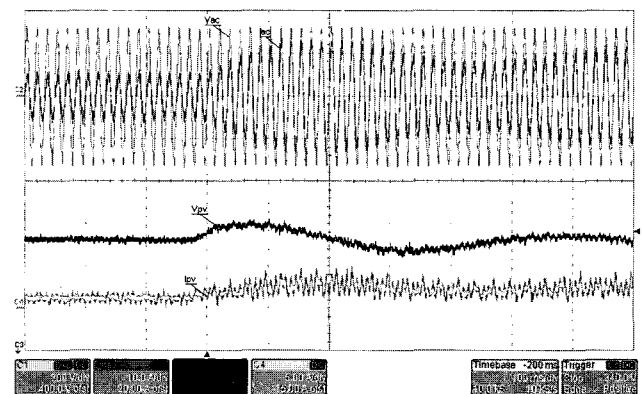


그림 9 인버터 및 태양전지 출력(일사량 250→500 [W/m²])
Fig. 9 Inverter and array output (irradiance 250→500 [W/m²])

4. 실 계통연계 보호 성능시험

태양광 인버터 계통연계 성능시험 시스템을 이용하여 개발된 3kW급 비절연형 인버터의 연계 보호 성능시험을 수행하였다. 실 계통 연계 보호성능 시험 항목은 신재생에너지 설비심사 세부기준에 준하여 정하였다. 신재생에너지 설비심사 세부기준은 신에너지 및 재생에너지 개발·이용·보급 촉진법 시행규칙 제 7조 1항의 설비인증심사 기준 제 2항의 설비심사기준으로 KS C 8540 "소출력 태양광 발전용 파워조절기의 시험방법" 등을 기반으로 작성된 것으로서, 정격출력 10kW 이하의 태양광발전용 인버터의 시험방법 및 평가 기준에 대하여 규정되어 있다.

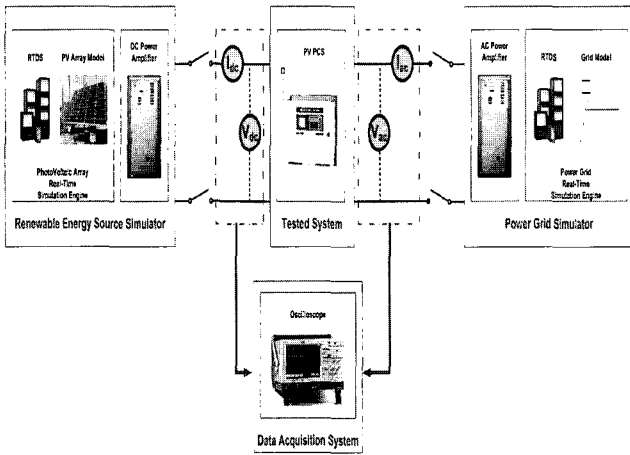


그림 10 태양광 인버터 보호성능 시험시스템 구성
Fig. 10 Test bed for protection performance of PV inverter

그림 10은 보호 성능시험 시스템의 구성도로 실시간 과도 현상을 시험하기 위해서 앞 3항의 그림 4 구성도에서 실제 계통전원 대신 교류 전력증폭기와 실시간 전력시물레이터를 사용한 전원 시물레이터를 이용한 시스템이다. 구성요소를 간략하게 요약하면 태양전지 시물레이터(RTDS), DC Power Amplifier System, 소규모 배전계통 시물레이터, AC Power Amplifier Module, 대상시스템 (3kW 비절연형 인버터)이며, 시험 항목은 신재생에너지 설비심사 세부기준의 계통연계 시험항목을 수행하였다.

4.1 출력 전압 보호기능 시험

상기 그림 10에서와 같이 시스템이 연계되어 운전되고 있는 상황에서 계통의 상전압을 220V에서 245V로 갑자기 상승시킨 후 인버터의 출력 특성을 측정하였다. 그림 11에서와 같이 인가 후 0.165초 후 인버터가 차단되었다. 전압보호기능이 정확하게 동작하고 있음을 확인할 수 있었다. 또한 출력 부족전압 보호기능 시험으로 계통의 상전압을 220V에서 190V로 떨어뜨린 후 인버터의 출력 특성을 측정하였다. 그림 12에서와 같이 인가 후 0.216 초 후에 인버터가 차단되었다. 그림에서 위부분은 계통의 상전압 및 전류를 표시하며, 아래 부분은 태양전지의 전압 및 전류를 나타낸다.

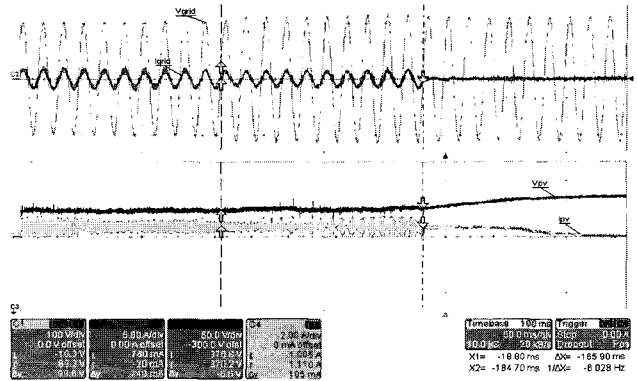


그림 11 과전압 보호 시험
Fig. 11 Over voltage protection test

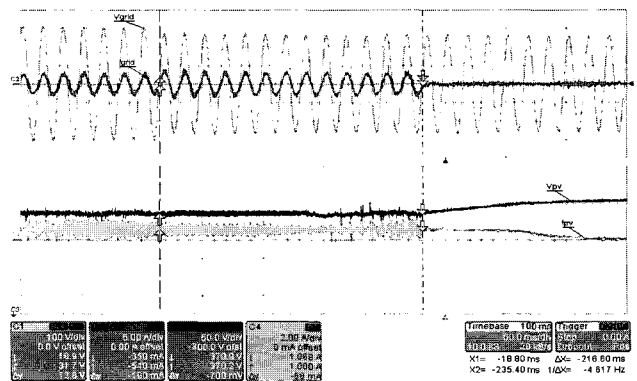


그림 12 부족전압 보호 시험
Fig. 12 Under voltage protection test

4.2 주파수 보호기능 시험

주파수에 대한 출력 특성을 시험하고자 계통의 주파수를 60Hz에서 60.7Hz로 변동 공급하고서 인버터의 출력특성을 체크하였다. 그림 13에서와 같이 인가 후 약 0.0963초 후에 인버터가 차단되었다. 반대로 주파수 저하 보호기능 시험을 체크 하고자 주파수를 60Hz에서 59Hz로 저하시킨 후 인버터의 출력특성을 체크 한 결과 그림 14에서와 같이 인가 후 약 0.113초 후에 인버터가 차단되었다.

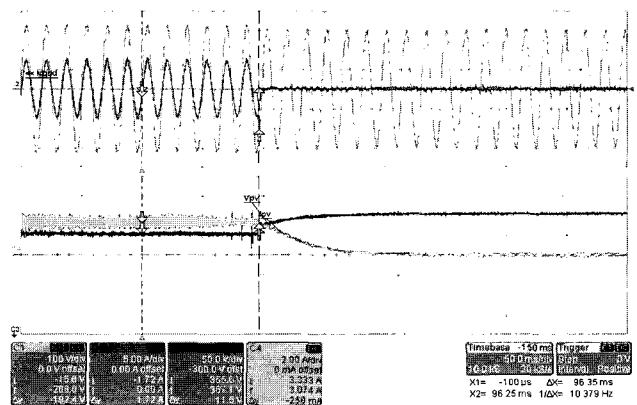


그림 13 주파수 상승 보호 시험
Fig. 13 Over frequency protection test

하는 샌디아 주파수 검출 능동적인 단독운전 검출방법을 동시에 내장하여 변압기 없는 인버터에 대한 보호기능을 더욱 강화시켰다. 따라서 성능 시험에서는 기존의 수동식 단독운전 검출 방식과 본 비절연형 인버터에 내장된 능동형 검출 방식의 검출 결과는 그림 19 및 그림 20과 같다. 그림의 그래프는 위에서부터 태양광 인버터의 출력전압, 태양전지의 출력전류, 인버터의 출력전류 및 단독운전 발생 Trigger 신호를 나타낸다. Trigger 신호가 0에서 교류신호를 내는 시점이 계통이 차단하여 단독운전이 발생하는 시점이다. 그림 19의 수동적 방식의 경우 계통전원이 상실되고 단독운전이 발생 시 단독운전을 판별하여 태양광 인버터를 차단하는 데에 약 0.5초 걸렸다. 국내의 분산전원의 연계 기준에서는 0.5초 이내로 차단할 것을 규정하고 있으므로, 이 규정에 부합되나 때에 따라서는 현장 상황에 따라서 차단속도가 0.5초 이상이 될 가능성이 있다. 그러나 능동형 알고리즘을 적용한 인버터의 경우 그림 20에서와 같이 동일한 조건에서 차단속도가 약 0.13초 정도로 판별 및 차단 성능이 상당히 개선되었기 때문에 단독운전이 발생하는 경우 안전하게 차단할 수 있다.

5. 결론

기존 태양광발전용 인버터는 주로 변압기를 포함한 형태이었으나 최근에는 콤팩트하고 가격이 저렴한 비절연형 인버터가 많이 사용되고 있다. 비절연형 인버터는 제어회로 특히 보호회로가 중요하기 때문에 본 논문에서는 전압 및 전류 보호기능, 주파수 보호기능, 순간정전 및 전압저하 보호기능 및 단독운전 보호기능을 일체화하여 내장한 지능형 보호제어기를 적용하였다. 단독운전 검출을 위하여 수동적인 보호제어 방법은 물론이거니와 계통연계점에서 주파수 변화에 따른 출력변화를 데드타임에 적용시켜 이 데드타임을 변동시켜 줌으로써 인버터 출력지령 전류에 의해 주파수를 발산시켜 단독운전을 검출하는 샌디아 주파수 방식을 동시에 적용하였다. 이와 같은 지능형 보호 및 제어기를 내장한 3kW급 비절연형 태양광 인버터를 제작하여 기본 성능 시험, 출력성능 시험 및 실 계통 연계 보호성능 시험을 통해서 지능형 보호제어기를 내장한 태양광 인버터의 성능을 확인하였다. 이는 곧 현장 적용 가능성을 검증하는 것으로 본 논문에서 그 효용성을 입증하였다.

참 고 문 헌

- [1] 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.
- [2] 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.
- [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, March 2004.
- [4] S.K.Kim, E.S.Kim, "PSCAD/EMTDC를 이용한 계통연계형 태양광발전시스템의 모델링 및 모의해석", 대한전기학회 논문지 54A권 3호, 2005년 3월, pp. 107-116.
- [5] E.S.Kim 외, "RTDS 시험모듈을 이용한 태양광인버터의 성능시험에 관한 연구", 대한전기학회 논문지 제56권 2호, 2007년 2월, pp. 325-333.

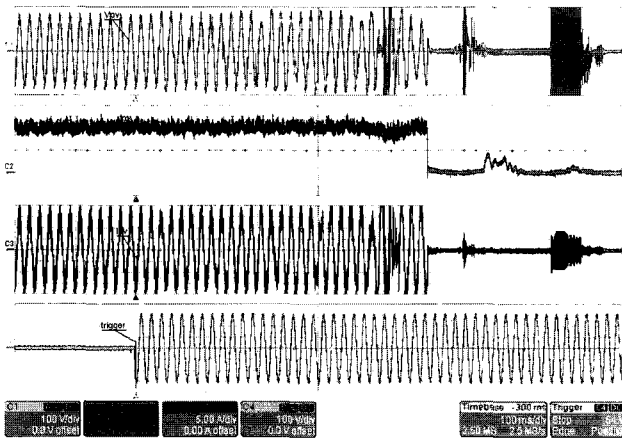


그림 19 수동방식에 의한 단독운전 시험
Fig. 19 Anti-islanding test (passive method)

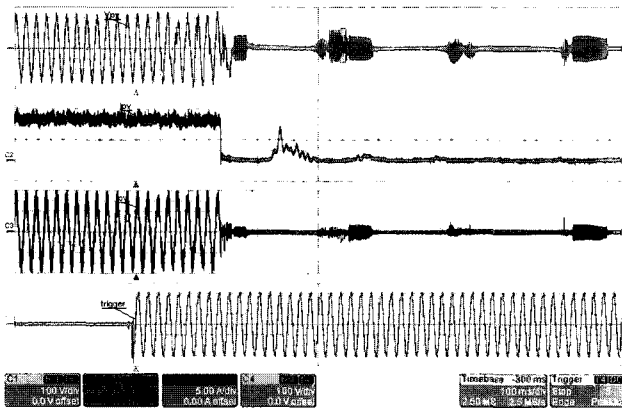


그림 20 능동방식에 의한 단독운전 시험
Fig. 20 Anti-islanding test (active method)

저 자 소 개



김응상 (金應相)

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

Tel : 055-280-1330

E-mail : eskim@keri.re.kr



전진홍 (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



김슬기 (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 : blkssheep@keri.re.kr



안종보 (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