

A Power Quality Analysis of a Photovoltaic System

정 종 욱[†] · 김 선 구* · 최 명 일**
(Jong-Wook Jung · Sun-Gu Kim · Myeong-Il Choi)

Abstract - This paper describes a power quality analysis of a photovoltaic generating systems. Prior to the power measurement, domestic and foreign codes related to the photovoltaic generating systems were briefly summarized. After constructing about 5kW photovoltaic systems, input/output voltages and currents were measured to compare and analyze the power quality by the module type. Based on the measured values, a couple of factors such as active power, power factor, total harmonic distortion(THD) was calculated and analyzed.

Key Words : Power Quality Analysis, Photovoltaic Generating System, Module Type, Active Power, Power Factor, THD

1. 서 론

산업혁명 이후 괄목할만한 산업의 발전은 인간이 문화의 혜택을 누리는데 많은 기여를 해왔다. 인간은 삶을 영위하면서 기본적으로 의·식·주와 관련된 많은 제품을 소비하게 되며, 이같은 제품을 만들어 내는데는 필연적으로 많은 에너지와 자원이 소모된다. 그러나 인간의 이기적이고 무분별한 에너지 자원 개발로 석탄, 석유, 가스와 같은 화석연료들이 빠른 속도로 고갈되어 감에 따라 최근 에너지 위기 관리의 중요성이 전 세계적인 관심사로 대두되어 왔다. 이같은 글로벌 이슈인 '저탄소 녹색성장'에 보조를 맞춰 우리 정부도 '태양광주택 10만호 보급사업', 고효율·신·재생에너지 설비를 갖춘 '그린홈'으로 보급자리주택 공급, '에너지소비총량제', '에너지목표관리제', '에너지효율등급인증서' 등과 같은 여러 가지 녹색에너지 지원·육성책을 다각적으로 마련해 왔다[1]. 녹색성장을 제2의 산업혁명이라고 표현하는 학자도 있듯이, 이는 일종의 에너지 혁명으로서 사회 전 부문의 패러다임 시프트를 의미하므로 기업, 가정, 정부 등 모든 경제주체와 국민이 동참할 때 비로소 완성될 수 있다.

이같은 사회적 이슈가 되어온 신·재생에너지 중에서도 태양광 발전설비는 청정에너지, 무한에너지라는 인식이 지배적인 가운데 단연 각광받고 있으며, 정부의 저탄소 녹색성장 정책에 따라 관심과 투자가 날로 증가하고 있다. 그러나, 현

재 태양광 발전설비와 관련된 국내의 연구동향을 살펴보면, 태양광 발전설비의 양적인 팽창 속에서 소재기술인 태양광 셀의 효율 향상과 관련된 연구와 응용기술이라고 할 수 있는 태양광 발전설비에 대한 진단기술, 연계기술 등이 주를 이루고 있으나[2-5], 이에 비해 기반기술이라 할 수 있는 제반 기술규정들 및 이에 대한 연구는 현재 다소 간단하고 개념적인 내용만을 다루고 있는 관계로 민원 내용 중 "사용전 검사 및 기준 지침"과 관련된 내용이 61%를 점유하고 있다 [6]. 이는 태양광 발전설비의 시공·유지관리·점검·검사 시에 실무적인 제반 애로사항이 발생하고 이것을 해결할만한 명확한 기술지침 등이 아직은 미흡하기 때문으로 판단되며, 운용상의 안전은 물론 계통 전체적으로도 부정적인 영향을 미칠 수 있다. 이같은 부정적 영향의 일례로서 전력계통에 영향을 미칠 수 있는 신·재생에너지 전원의 출력 변동, 태양광 직류회로의 부적절한 배선방법, 차단기, 축전지 등에 대한 규정, 신·재생 발전원의 출력에 포함된 고조파 성분이 과도하여 계통에 접속된 타설비의 동작에 미치는 부정적 영향 등을 들 수 있으며[7-9], 이를 해결하기 위한 구체적 기술 지침이 조속히 마련되어 실무 적용상의 혼동을 최소한으로 줄여나가야 할 것이다.

본 연구에서는 박막형과 단결정형 태양광 발전설비의 입·출력 전압·전류를 측정하여 전력품질을 비교·분석함으로써 발전전압과 관련된 기술지침을 작성하는데 활용하고자 한다.

2. 국내·외 관련 규정 검토

본 장에서는 태양광 발전설비와 관련된 국·내외 규정을 검토하였다.

2.1 국내 관련규정 검토

태양광 발전설비와 관련된 국내의 규정을 검토한 결과, 5가지 정도로 요약될 수 있으며, 아래에 이를 정리하였다.

* 정 회 원 : 한국전기안전공사 책임연구원

** 정 회 원 : 한국전기안전공사 주임연구원

† 교신저자, 충신회원 : 한국전기안전공사 선임연구원·공박

E-mail: phdjung@korea.com

접수일자 : 2009년 11월 11일

최종완료 : 2009년 11월 14일

<본 논문은 본 학회 2009년도 전기설비전문위원회 추계학술대회에서 우수논문으로 선정되어 편집위원회에서 심사 후 본 논문지에 게재 되었음>

- 전기설비 기술기준의 판단기준(산자부 공고 제2006-213호, 2006.8.1) : 연료전지 및 태양전지 모듈의 절연내력(판단 15조), 태양전지 모듈 등의 시설(판단 54조)
- 전기사업용 전기설비 검사업무 처리지침(에너지안전과-484, 2005.3.11) : 사업용전기설비 전반적인 검사업무에 대해 규정
- 자가용 전기설비 검사업무 처리지침(지식경제부 훈령 제18호, 2008.9) : 자가용전기설비(저압 200 kW 이하) 전반적인 검사업무에 대해 규정
- 분산형 전원 환전 계통 연계 기술기준(한국전력공사) : 전력품질, 보호계전장치 설치, 계통이상 시 분산형 전원 발전설비 분리 등(수용가 측면 설명 다소 미흡)
- 신에너지 및 재생에너지 개발이용보급촉진법(산업자원부고시 제2008-3호) : 주로 태양전지, 모듈, 인버터, 축전지 등의 단위기구나 부품차원의 제품 향상(시스템 차원의 전기설비의 시설에 관한 규정 언급 없음)

2.2 국외 관련규정 분석

태양광 발전설비와 관련된 선진 3개국의 규정을 아래와 같이 비교·검토하였다[10,11].

- NEC Article690-Solar Photovoltaic Systems(미국) : 태양광 설비별 세부 정의, 회로 조건, 최대값 및 회로 규모 설정, 과전류 보호, 단로장치, 배선법, 접지, 마킹법, 타전원과의 접속, 저장용 배터리, 600V 초과 시스템 등에 대해 설비장치별, 직·교류 회로별, 시공조건별로 보다 상세하고 구체적으로 상술
- CEC(Canadian Electrical Code) 및 해설서 Section50-Solar Photovoltaic Systems(캐나다) : 용어 정의, 마킹법, 태양광전지의 전압전류, 정격 및 전압 전류변동 안전여유, 온도조건 등, 설비 및 전선에 대한 과전류 보호, 단로장치 및 감전보호, 배선법, 플러그와 배선장치 부착법, 모듈접속법, 상호연계시스템 접속법 등에 대해 보다 구체적으로 상술
- 전기설비기술기준, 전기설비기술기준의 해석(일본) : 해석 제50조 : 태양전지모듈 등의 시설 관련 사항(충전부가 노출되지 말 것, 부하측 전로에 개폐기 시설할 것, 단락이 생긴 경우 전로를 보호하는 과전류차단기 등의 시설, 모듈 등의 시설방법 등)이 국내와 유사

이밖에 이탈리아와 스위스 등의 국가에서 적용하는 관련 규정 등도 검토하였으나, 유럽의 국가들은 주로 IEC를 자국화하여 적용하는 경우와 자체적인 운용자, 검사자 매뉴얼을 작성하여 실무에 적용하는 경우가 많은 것으로 확인되었다.

3. 태양광 발전설비 전력품질 분석

3.1 연구용 태양광 발전설비 구축

태양광 발전설비 설계, 시공 및 점검·검사 과정에 대한 모니터링 및 태양광 발전설비의 전력품질, 주파수 변동, 순간전압 변동 및 고조파 영향 등을 분석 후 문제점을 파악하고 개선안을 도출하기 위해 연구용으로 구축하였으며, 설치현장의 사진을 그림 1에 나타내었다.

그림 1에 보인 바와 같이, 태양광 발전설비의 모듈은 연구용

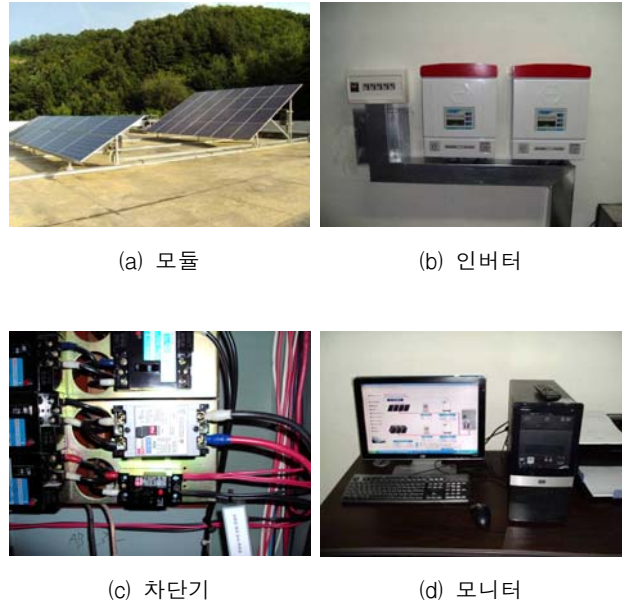


그림 1 태양광 발전설비 현장 설치 모습
Fig. 1 Construction site of photovoltaic systems

으로 비교를 위해 단결정형과 박막형으로 나누었으며, 모두 정남향으로 30°의 경사각을 두어 고정형으로 설치하였다. 시설용량은 단결정형과 박막형이 각각 2.475 kW_p, 2.464 kW_p로서 총 4.939kW_p를 그림 2와 같이 계통연계형으로 설치하였다. 전력품질의 측정은 테베트론 DEWE-3020을 활용하여 인버터와 모니터가 설치된 제어실에서 청명한 날 데이터의 안정화가 시작되는 10시 30분부터 16시 29분 57초까지 3초 간격으로 7,200개씩의 인버터의 입·출력전압과 전류를 측정하여 파형, 역률, 고조파 등의 팩터들을 분석하였다.

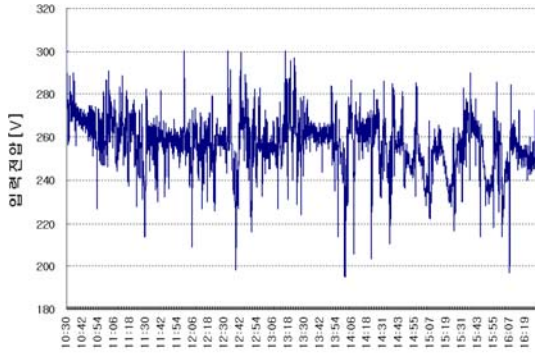


그림 2 태양광 발전설비 계통도
Fig. 2 Schematic diagram of photovoltaic systems

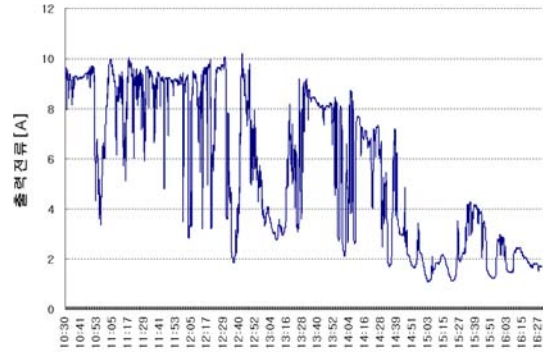
3.2 실험결과 및 고찰

태양광 발전설비 중 박막형 모듈의 인버터 입·출력전압의 실효값을 측정하여 그림 3에 나타내었다.

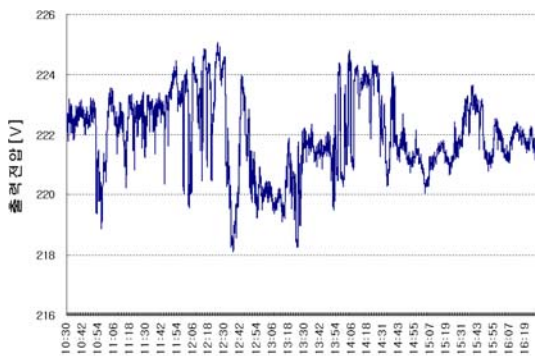
그림 3에 보인 바와 같이, 박막형 모듈 인버터의 입력전압은 태양광 셀에서 발전된 직류전압으로서 최대 302.1 V, 최소 195.2 V 및 평균 256.6 V가 측정되어 평균값으로부터 최대 23.9% 정도의 편차를 나타내었지만, 돌발적으로 급증 또는 급감하는 키성분의 전압을 제외하면 그 편차는 어느 정도 경감되는 것으로 나타났다. 또한, 인버터에서 교류로 변환된 출력전압의 실효값은 최대 225.1 V, 최소 218.1 V 및



(a) 입력전압



(b) 출력전류



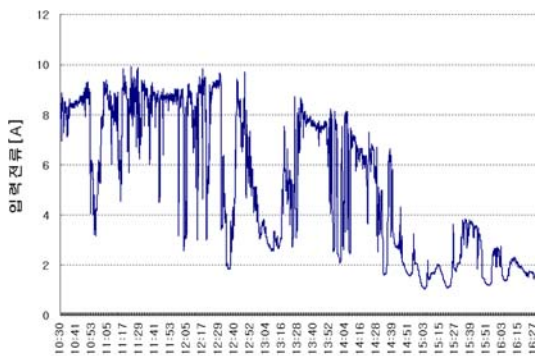
(b) 출력전압

그림 3 박막형 모듈로부터 측정된 전압 파형
Fig. 3 Voltage waveform acquired from thin film modules

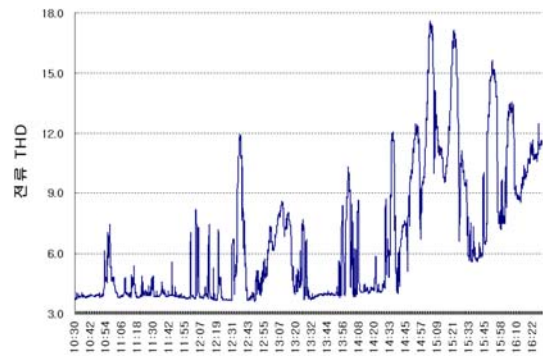
평균 222.0 V로 측정되어 평균값으로부터 최대 1.76% 정도의 편차를 나타내었으며, 입력전압보다는 직성분이 줄어 효과적인 파워컨디셔닝이 이루어졌음을 알 수 있었다.

박막형 모듈 인버터의 입·출력전류를 측정하여 그림 4에 나타내었다.

그림 4에 보인 바와 같이, 박막형 모듈 인버터의 입력전류는 직류성분으로서 최대 9.90 A, 최소 1.05 A 및 평균 5.24 A로 측정되었다. 또한, 인버터를 통해 교류로 변환된 출력전류의 실효값은 최대 10.18 A, 최소 1.10 A 및 평균 5.61 A로 측정되었으며, 12시 50분경 발생하여 30분 정도 지속된 입·출력전류의 국부적 감소는 전압의 감소와 함께 발생하였으므로, 구름 등의 환경적 원인에 의한 것으로 판단되었다.



(a) 입력전류

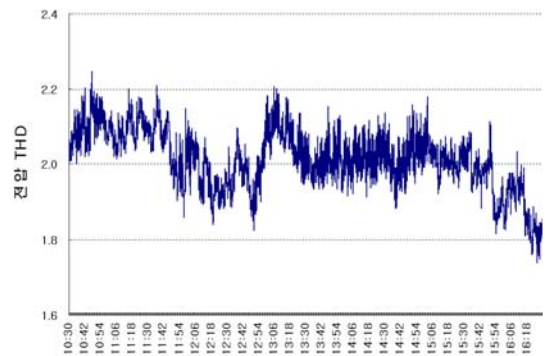


(b) 전류 THD

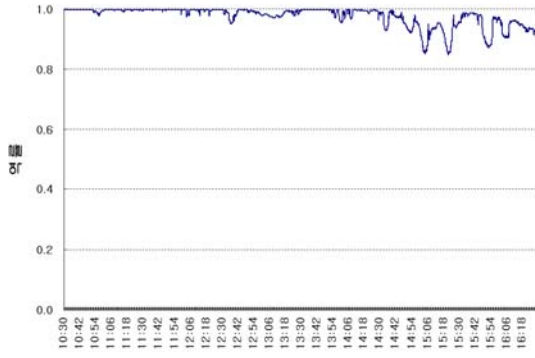
그림 4 박막형 모듈로부터 측정된 전류 파형
Fig. 4 Current waveform acquired from thin film modules

박막형 태양광 발전설비에서 취득한 출력전압·전류데이터를 기반으로 전압·전류 THD 및 역률과 유효전력을 계산하여 그림 5에 나타내었다.

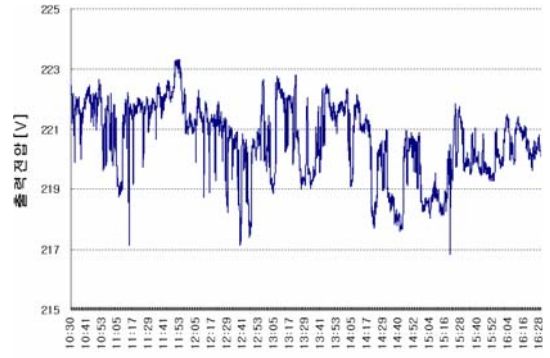
그림 5에 보인 바와 같이, 박막형 모듈의 전압 THD는 최대 2.25, 최소 1.74 및 평균 2.01로, 전류 THD는 최대 17.62, 최소 3.62 및 평균 6.57로 각각 계산되었다. 일반적으로 태양광 발전설비의 출력이 안정화되기 전의 전압 THD는 안정화되고 난 후보다 낮은 반면 전류 THD의 경우는 일출·일몰시와 같이 발전출력이 낮은 시간대에 THD가 높은 것으로 나타났다. 역률은 최대 0.998, 최소 0.847 및 평균 0.975를 각각 나타내었으며, 출력전류가 감소하고 전류 THD가 증가



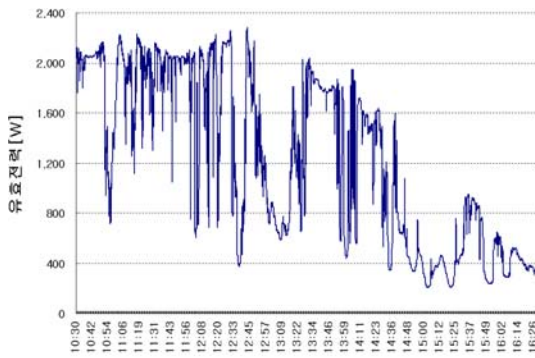
(a) 전압 THD



(c) 역률



(b) 출력전압



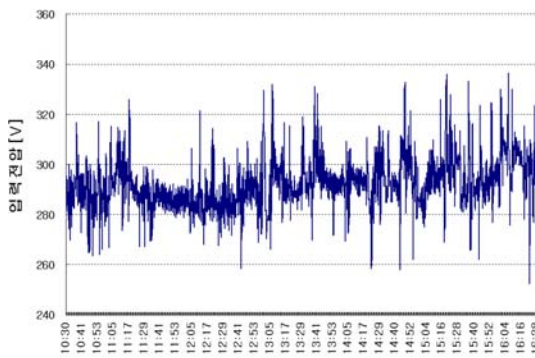
(d) 유효전력

그림 5 박막형 모듈의 전압·전류로부터 계산된 제반팩터
Fig. 5 Several factors calculated from V-I of thin film modules

하는 시점과 때를 같이 하여 역률이 저하하는 특성을 나타내어 전류의 변화가 역률에 직접적으로 기여한다는 것을 알 수 있었다. 또한, 유효전력의 경우 최대값 2,276.32 W, 최소값 205.68 W 및 평균값 1,232.74 W를 각각 나타내었다.

한편, 태양광 발전설비 중 단결정형 모듈의 인버터 입·출력전압의 실효값을 측정하여 그림 6에 나타내었다.

그림 6에 보인 바와 같이, 단결정형 모듈 인버터의 입력전압은 역시 태양광 셀에서 직접 발전된 직류성분으로서, 최대 336.3 V, 최소전압 252.5 V 및 평균 292.4 V로 측정되었다. 이는 평균값으로부터 최대 15.0%의 편차를 나타내는 것으로 박막형보다 낮은 것으로 분석되었으며, 박막형에서와 같이 킥전압을 제외하면 그 편차는 경감될 것으로 사료되었다.



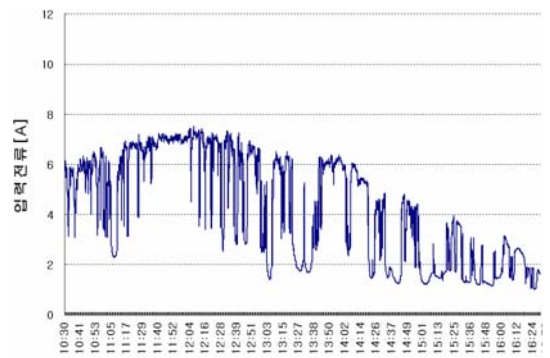
(a) 입력전압

그림 6 단결정형 모듈로부터 측정된 전압 파형
Fig. 6 Voltage waveform acquired from mono-crystalline modules

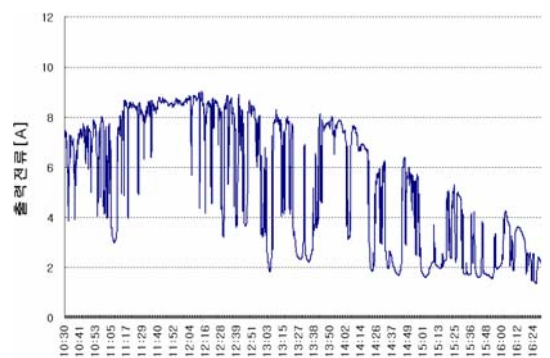
또한, 인버터에서 교류로 변환된 출력전압의 실효값은 최대 223.3 V, 최소 216.8 V 및 평균 220.6 V로 측정되어 평균값으로부터 최대 1.7%의 편차를 나타내었으며, 이는 입력값보다 낮은 값으로 킥성분의 감소가 어느 정도 기여했기 때문이라고 사료된다.

단결정형 모듈 인버터의 입·출력전류를 측정하여 그림 7에 나타내었다.

그림 7에 보인 바와 같이, 단결정형 모듈 인버터의 입력전류도 직류성분으로서 최대 7.49 A, 최소 1.02 A 및 평균 4.29 A로 측정되었으며, 인버터를 통해 교류로 변환된 출력



(a) 입력전류

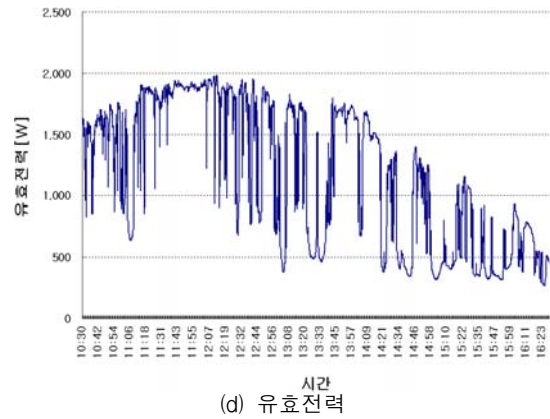


(b) 출력전류

그림 7 단결정형 모듈로부터 측정된 전류 파형
Fig. 7 Current waveform acquired from mono-crystalline modules

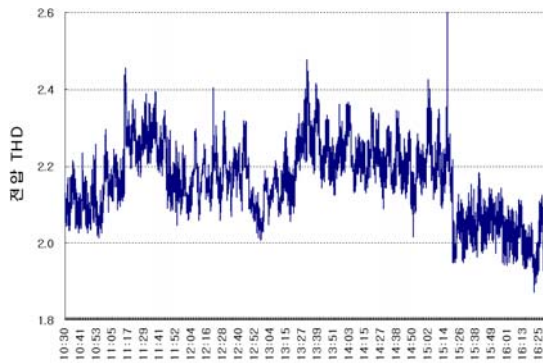
전류는 최대 9.01 A, 최소 1.37 A 및 평균 5.44 A로 각각 측정되었다. 박막형과 마찬가지로 입력단 대비 출력단의 전압은 감소하고 전류는 증가하는 경향을 나타내었다.

그림 8에 보인 바와 같이, 단결정형 모듈의 전압 THD는 최대 3.91, 최소 1.87 및 평균 2.16으로, 전류 THD는 최대 7.49, 최소 1.61 및 평균 3.13으로 각각 계산되어 박막형에 비해 전압 THD는 약간 높고 전류 THD는 낮은 것으로 분석되었으며, 박막형과는 달리 입·출력전류가 감소하더라도 THD가 급변하는 현상은 관찰되지 않고 비교적 안정한 특성을 나타내었다. 역률은 최대 0.993, 최소 0.880 및 평균 0.974를 나타내어 박막형과 거의 비슷한 수준임을 알 수 있었다. 또한, 유효전력의 경우 최대값 1,984.79 W, 최소값 264.73 W 및 평균값 1,183.28 W를 각각 나타내었다.

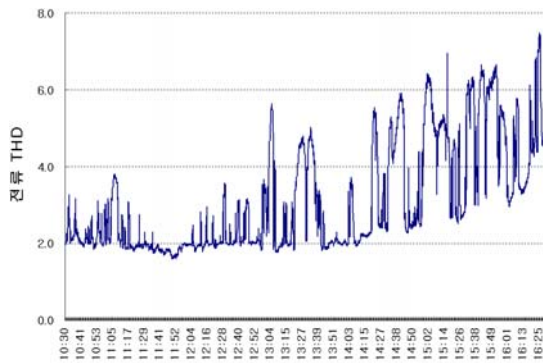


(d) 유효전력

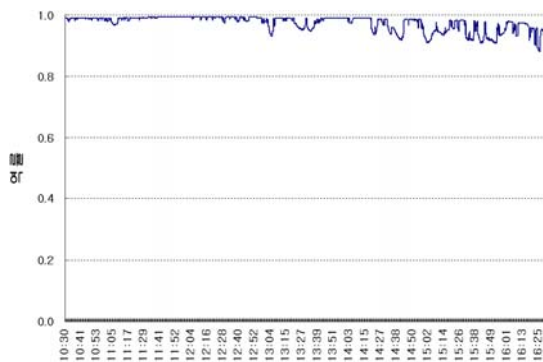
그림 8 단결정형 모듈의 전압·전류로부터 계산된 제반팩터
Fig. 8 Several factors calculated from V·I of mono-crystalline modules



(a) 전압 THD



(b) 전류 THD



(c) 역률

4. 결 론

본 논문에서는 박막형과 단결정형 태양광 모듈에서 발견되어 인버터로 변환되기 전·후의 전압·전류 특성을 분석하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 박막형 모듈 및 단결정형 모듈 인버터의 입력전압은 평균값으로부터 각각 23.9%, 15.0% 정도의 편차를 나타내어 단결정형 모듈 입력전압의 편차가 작았으며, 이는 모두에서 관찰되는 킥성분으로 인한 것으로 사료된다. 또한, 인버터에서 교류로 변환된 출력전압의 실효율은 평균값으로부터 각각 1.76%, 1.7% 정도의 편차를 나타내었으며, 입력전압보다는 킥성분이 경감되었다.
- 2) 박막형 모듈 및 단결정형 모듈 인버터의 출력전압은 입력전압보다 낮은 반면, 출력전류는 입력전류보다 약간 증가하는 경향을 나타내었다.
- 3) 박막형 모듈 및 단결정형 모듈의 발전출력이 낮을 경우 전압 THD는 낮아지고 전류 THD는 높아졌으며, 이 경우는 발전출력이 낮은 시간대에 THD가 높았다. 또한, 단결정형은 박막형에 비해 전압 THD는 약간 높고 전류 THD는 낮은 것으로 분석되었으며, 박막형과는 달리 입·출력전류가 감소하더라도 THD가 급변하는 현상은 관찰되지 않고 비교적 안정한 특성을 나타내었다. 박막형과 단결정형이 거의 비슷한 값을 나타내었으며, 특히, 박막형의 경우 전류의 변화는 역률에 직접적으로 영향을 주는 것으로 판단되었다.

감사의 글

본 연구는 2008년도 전력산업연구개발사업의 재정적 지원에 의한 것으로서, 관계부처에 감사 드립니다.

참 고 문 헌

- [1] 정중욱, 김선구, “태양광 발전설비 검사 기술”, 대한전기학회 하계학술대회 논문집, 2009. 7.

[2] D.W. Han, J.H. Heo, D.J. Kwak, C.H. Han, Y.M. Sung, "Texture, Morphology and Photovoltaic Characteristics of Nanoporous F:SnO₂ Films", Journal of Electrical Engineering & Technology, Vol.4, No.1, pp.93-97, 2009. 3.

[3] 이종필 외 3, "태양광 발전시스템 전지모듈의 온라인 감시 진단 시스템 개발", 제59P권 제4호, pp.168-172, 2007. 12.

[4] S.K. Kim, J.H. Jeon, E.S. Kim, "PSCAD/EMTDS Based Modeling and Simulation Analysis of a Grid-Connected Photovoltaic Generation System", Vol.54, No.3, pp.107-116, 2005. 3.

[5] Saiful Islam and Ronnie Belmans, "Grid Independent Photovoltaic Fuel-Cell Hybrid System: Design and Control Strategy", KIEE Intn'l Trans. on Electrical Machinery and Energy Conversion Systems", Vol.5-B, No.4, pp.399-404, 2005.

[6] 김선구 외 4, 태양광 발전설비의 점검·검사를 위한 전기설비 시설 지침 개발, 1차년도 평가보고서 2008T10 0100343, 한국전기안전공사, pp. 25-31, 2009. 10.

[7] 이현화, 저탄소 녹색성장을 위한 태양광 발전, 기다리, pp. 120-126, 2009. 1.

[8] 이순형, J. Monteiro, S. Devadas, and B. Lin, "A Methodology for Efficient Estimation of Switching Activity in Sequential Logic Circuits," ACM/IEEE Design Automation Conf., pp. 12-17, 1994.

[9] 왕강 외 3, "태양광 발전시스템의 일사량에 따른 출력 특성", KIEE 춘계학술대회 논문집, pp. 189-191, 2009.

[10] Johnny Weiss, Photovoltaics Design and Installation Manual, New Society Publishers, pp. 52-54, 2007. 4.

[11] Ingrid Weiss 외, European Best Practice Report, PV Policy Group, 2006. 5.



김 선 구 (金 善 球)

1961년 2월 25일생. 1985년 한양대학교 전기공학과 졸업(학사). 2009년 서울시립대학교 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1991년~현재 한국전기안전공사 전기안전연구원 책임연구원

Tel : 031-580-3071

Fax : 031-580-3111

E-mail : 1000masan@korea.com



최 명 일 (崔 明 日)

1975년 5월 30일생. 2002년 국립창원대학교 전기공학과 졸업. 2004년 동대학원 졸업(석사). 2009년 광운대학교 정보통신대학원 졸업(석사). 2003년~현재 한국전기안전공사 전기안전연구원 주임연구원

Tel : 031-580-3058

Fax : 031-580-3052

E-mail : ken2003@kesco.or.kr

저 자 소 개



정 종 욱 (鄭 鍾 旭)

1969년 2월 17일생. 1992년 숭실대학교 전기공학과 졸업(학사). 1997년/2003년 동대학원 전기공학과 졸업(석사/박사). 2004년~현재 한국전기안전공사 전기안전연구원 선임연구원

Tel : 031-580-3063

Fax : 031-580-3111

E-mail : phdjung@korea.com