

<https://doi.org/10.7236/JIIBC.2022.22.3.201>
JIIBC 2022-3-29

낮은 일조량 구간에서 에너지 하베스팅 기술을 통한 발전량 향상

Improvement of Power Generation through Energy Harvesting Technology in Low Sunlight Section

윤용호*

Yongho Yoon*

요약 에너지 하베스팅(Harvesting)은 1954년 미국 벨 연구소가 태양광을 에너지로 바꾸는 태양전지 연구를 진행하면서 소개된 개념이다. 이러한 에너지 하베스팅 기술은 일상생활 속 버려지거나 미활용 되는 에너지를 모아 전력으로 재활용하는 기술로서 에너지를 효율적으로 활용할 수 있게 하는 친환경 에너지 방안 중 하나로서 다양한 에너지를 적용할 수 있다. 특별히 태양광발전시스템의 경우 맑은 날에 비해 흐린 날씨에 전력생산 Loss가 발생하는 형태로 인버터에서 발생하는 전력 소모를 줄이기 위해, 배터리를 이용하여 발생하는 전기를 저장함으로써 에너지 하베스팅을 적용할 수 있다. 따라서 본 논문에서는 일출, 일몰, 흐린 날씨 등의 낮은 일조량 구간에서 에너지 하베스팅 기술을 적용하여 인버터 동작 최저전압 이하 및 소멸하는 전력을 회수하여 발전량을 개선하고자 한다. 이에 따라 태양광발전 전력량에 따른 시스템 및 알고리즘 개발과 일몰, 일출, 그 밖에 환경에서 발전되는 저 전력을 이용한 시스템과 알고리즘 개발을 통해 연구내용을 증명하였다.

Abstract Energy harvesting is a concept introduced in 1954 by Bell Labs in the US while conducting research on solar cells that convert sunlight into energy. Such energy harvesting technology is a technology that collects wasted or unused energy in daily life and recycles it as electric power. In particular In the case of a photovoltaic power generation system, energy harvesting can be applied by storing electricity generated by using a battery to reduce power consumption generated by the inverter in the form of loss of power generation in cloudy weather compared to sunny days. Therefore, in this paper, energy harvesting technology is applied in the low sunlight section such as sunrise, sunset, and cloudy weather to improve the amount of power generation by recovering the power that is below the minimum operating voltage of the inverter and dissipated. Accordingly, the research contents were verified through the development of systems and algorithms according to the amount of solar power generation and the development of systems and algorithms using low power generated in sunset, sunrise, and other environments.

Key Words : Energy Harvesting, Power Generation, Battery, Inverter, Solar Power, Energy Storage System

*정회원, 광주대학교 전기전자공학부
접수일자: 2022년 3월 30일, 수정완료: 2022년 5월 10일
게재확정일자: 2022년 6월 10일

Received: 30 March, 2022 / Revised: 10 May, 2022 /
Accepted: 10 June, 2022

*Corresponding Author: yhyoon@gwangju.ac.kr
School of Electrical and Electronic Engineering,
Gwangju University, Gwangju, Korea

I. 서 론

에너지 하베스팅(Harvesting)은 1954년 미국 벨 연구소가 태양광을 에너지로 바꾸는 태양전지 연구를 진행하면서 소개된 개념이다. 당시 전력을 생산하는 방식은 발전기를 통한 방식만 있었기 때문에 태양열 등의 자연 에너지들은 버려지는 에너지로 인식되어, 버려지는 에너지를 모아 전기를 생산한다는 개념으로 '하베스트(harvest)'라는 단어가 사용되었지만, 현재는 의미가 확장되어 자연 에너지뿐 아니라 우리 주변에서 낭비되는 모든 에너지를 전기로 변환하는 기술이라는 의미로 사용되고 있다. 이러한 에너지 하베스팅 기술은 일상생활 속 버려지거나 미활용 되는 에너지를 모아 전력으로 재 활용하는 기술로서 에너지를 효율적으로 활용할 수 있게 하는 친환경 에너지 방안 중 하나로서 다양한 에너지를 적용할 수 있다^[1].

특히 태양광발전시스템의 경우 맑은 날에 비해 흐린 날씨에 전력생산 Loss가 발생하는 형태로 인버터에서 발생하는 전력 소모를 줄이기 위해, 배터리를 이용하여 발생하는 전기를 저장함으로써 에너지 하베스팅을 적용할 수 있다^[2]. 따라서 본 논문에서는 일출, 일몰, 흐린 날씨 등의 낮은 일조량 구간에서 에너지 하베스팅 기술을 적

용하여 인버터 동작 최저전압 이하 및 소멸하는 전력을 회수하여 발전량을 개선하고자 한다. 이에 따라 태양광 발전 전력량에 따른 시스템 및 알고리즘 개발과 일몰, 일출, 그 밖에 환경에서 발전되는 저 전력을 이용한 시스템과 알고리즘 개발을 통해 연구내용을 증명하였다.

II. 에너지 하베스팅(Harvesting) 연구의 필요성^[3,4]

1. 일몰, 일출, 흐린 날 환경의 태양광 발전장치 운영 효율 개선의 필요

(1) 맑은 날과 흐린 날의 태양광발전 분석

그림 1의 빨간색 부분은 태양광발전을 하기 위해 인버터가 소모하는 전력량이며, 녹색 부분은 인버터의 소모량을 뺀 한전 계통에 공급하는 전력량을 나타내고 있다. 일출과 일몰 전후 ±2시간 때에는 일사량의 부족과 발전을 진행하면서 모듈에서 공급되는 전력을 인버터에서 거의 소모하기 때문에 태양광발전시스템의 발전전력은 낮은 상태를 보여주고 있다.

그러나 비가 오거나 구름이 많은 날에는 인버터 내부



그림 1. 태양광 발전량에 따른 Mode

Fig. 1. Mode according to the amount of solar power generation

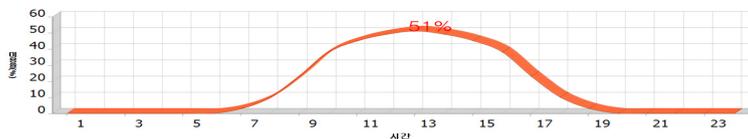


그림 2. 시간대별 태양광발전 시스템 이용률

Fig. 2. Photovoltaic power generation system utilization rate by time period

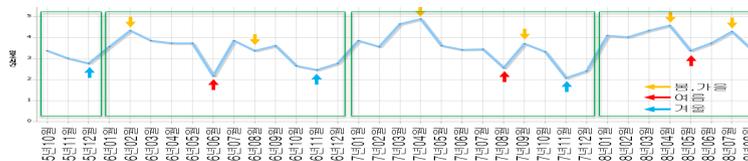


그림 3. 계절별 태양광발전 시간

Fig. 3. Photovoltaic power generation time by season

의 전력 변환 과정을 통해 손실 전력량이 발생하여 태양광 발전시스템의 생산성에 많은 부분을 감소시키고 있다.

(2) 소·중형 태양광 발전시스템의 문제점

일반적인 태양광발전시스템의 경우 대략 날씨가 흐린 날일 경우 시스템의 효율은 1~3%, 날씨가 맑은 날의 시스템 효율은 최대 75% 정도이다. 따라서 비가 오거나 흐린 날의 경우 태양광 모듈에서 공급되는 전력을 각 인버터가 낮은 효율로 발전하기 때문에 현실적으로 모듈에서 공급되는 전력의 30% 이상을 인버터가 소모하는 문제점을 가지고 있다.

(3) 시간대별 태양광발전 이용률 분석

- 태양광발전은 일조량이 가장 많은 정오에서 오후 1시 사이에 최대 발전을 하고 일몰 후 발전을 마치는 일일 주기를 갖는다. 계절 및 지역, 날씨에 따라 발전을 전혀 하지 못하는 경우도 발생하지만, 2년간의 발전실적을 분석한 그림 2와 같은 결과를 얻었다.
- 그림 2에서 나타난 시간대별 태양광발전시스템 이용률은 13시를 기준으로 형성된 정규분포와 흡사한 모습을 보이며 태양광발전은 태양의 주기에 순응한다는 사실을 데이터 분석을 통해서 확인할 수 있다.

(4) 계절별 태양광발전 이용률 분석

- 우리나라와 같이 4계절이 뚜렷한 지역에서는 태양광발전 역시 계절별로 다른 발전 특색을 나타내며 그림 3과 같이, 봄·가을철에는 최고 4.8 hour 이상의 높은 이용률을 나타내지만, 여름·겨울철에는 2.4 hour 전·후반 대의 낮은 이용률을 보인다.
- 일조량이 많은 여름철에 가장 높은 이용률을 보여야 하지만, 실제로는 겨울철과 비슷한 낮은 수준의 이용률을 나타내고 있다.
- 이는 크게 두 가지 요인으로 여름철에 발생하는 장마로 인해 일조량 부족과, 태양광 셀의 특성상 높은 열에는 효율이 낮아지는 이유로 인해 4계절이 뚜렷한 우리나라에서는 날씨가 맑고, 기온이 서늘한 봄·가을철에 태양광발전 이용률이 가장 높게 나타난다.

III. 낮은 일조량 구간에서 발전량 증가를 위한 에너지 하베스팅 연구^[5,6]

낮은 일조량 구간에서 발전량 증가를 위하여 에너지 하베스팅 시스템을 태양광모듈, 발전 효율 분석용 모니터링 장치, 하베스팅 장치, 태양광인버터, 에너지저장장치(ESS)를 통하여 그림 4와 같이 구성하였다.

또한 구성된 시스템을 통하여 일출, 일몰, 흐린 날씨 등의 낮은 일조량 구간에서 에너지 하베스팅 기술을 적용하기 위하여 본 논문에서는 태양광모듈, 태양광인버터, 에너지저장장치(ESS)의 Battery를 그림 7과 같이 태양광의 발전량에 따라 출력 Mode를 분류하여 시스템을 설계하였다.

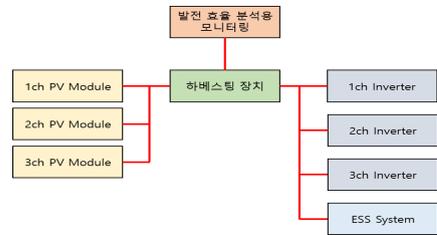


그림 4. 발전량 증가를 위한 에너지 하베스팅 시스템 구성도
 Fig. 4. Diagram of energy harvesting system to increase power generation

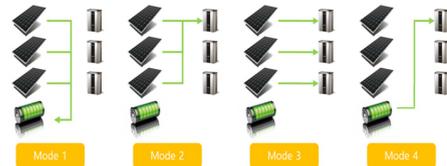


그림 5. 태양광 발전량에 따른 태양광&ESS의 출력모드
 Fig. 5. Photovoltaic & ESS output mode according to the amount of solar power generation

그림 1과 그림 5의 1번 Mode는 일출, 일몰 때 발생하는 전력을 ESS에 충전하는 방식, 2번 Mode는 발전 효율이 낮은 시간 때 1개 채널을 통하여 태양광을 통한 발전 모드, 3번 Mode는 태양광발전이 원활하게 발전할 때 사용하는 모드, 4번 Mode는 저녁 시간 태양광발전이 없을 때 에너지저장장치(ESS)를 통하여 발전하는 모드로 구성하였다.

1. 태양광발전 전력량에 따른 시스템 구성

그림 4에서 나타난 발전 효율 분석용 모니터링 장치를

통하여 태양광발전 전력량을 분석하여 낮은 일조량 구간에서 각 모드별 발전량 증가를 위해 다음과 같이 시스템이 기능별로 동작될 수 있도록 설계하였다. 또한 비, 눈, 흐린 날에는 태양광 발전량을 감지하여 최고 발전효율을 발전할 수 있도록 하였다.

- 1번 Mode : 태양광 발전량이 인버터 소모 전력보다 적은 일출, 일몰 시간에는 인버터를 통한 계통 발전이 아닌 에너지저장장치(ESS)를 충전시켜 발전 효율을 향상할 수 있도록 그림 6과 같이 구성하였다.

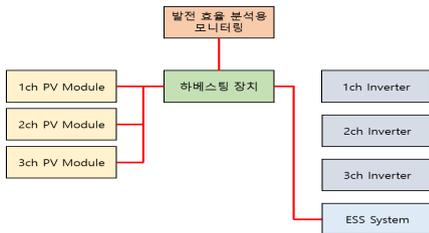


그림 6. 1번 Mode 시스템 구성도
Fig. 6. Mode 1 system configuration diagram

- 2번 Mode : 인버터 소모전력 보다 발전량이 많지만 발전 효율이 높지 않은 시간에는 한 개 채널의 발전이 아닌 다채널을 연계하여 발전 효율을 향상할 수 있도록 그림 7과 같이 구성하였다.

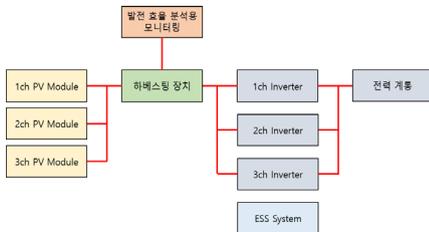


그림 7. 2번 Mode 시스템 구성도
Fig. 7. Mode 2 system configuration diagram

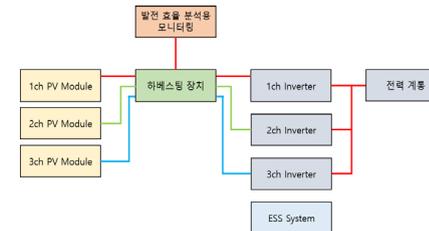


그림 8. 3번 Mode 시스템 구성도
Fig. 8. Mode 3 system configuration diagram

- 3번 Mode : 일반적인 발전 시간에는 개별 발전을 하며 발전할 수 없는 저녁 시간에는 충전된 에너지저장장치(ESS)의 에너지를 방전하여 지속적인 발전이 가능하도록 그림 8과 같이 구성하였다.
- 4번 Mode : 태양광 발전이 불가능한 저녁시간 때 지속적인 발전을 위해 에너지저장장치(ESS)를 이용한 발전 방식으로 그림 9와 같이 구성하였다.

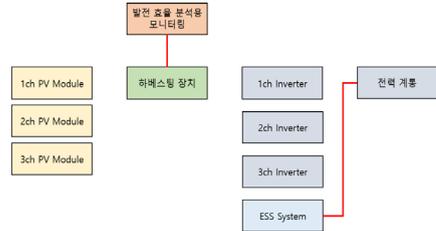


그림 9. 4번 Mode 시스템 구성도
Fig. 9. Mode 4 system configuration diagram

2. 일출, 일출, 그 밖에 환경에서 발전되는 저 전력을 이용한 시스템 구성

저 전력이 발생하는 각 상황에 따른 모드별 시스템이 적용될 수 있도록 구성하였으며 각 모드는 태양광에서 출력되는 전력량을 기준으로 모드에 맞게 자동으로 동작할 수 있게 설계하였다. 각 모드에 따른 상태 및 개발된 GUI는 다음과 같이 정리할 수 있다.

- 일출, 일몰시간 : 에너지저장장치(ESS) 충전 모드
일출, 일몰 시간 때는 발전한 전력량이 인버터 소모 전력보다 낮기에 계통으로 보내기에 어려운 상황이다. 따라서 3개의 태양광 채널을 연계하여 에너지저장장치(ESS)에 충전이 가능하도록 알고리즘을 구성하였으며 그 상태를 사용자가 쉽게 확인 할 수 있도록 GUI를 그림 10과 같이 개발하였다.

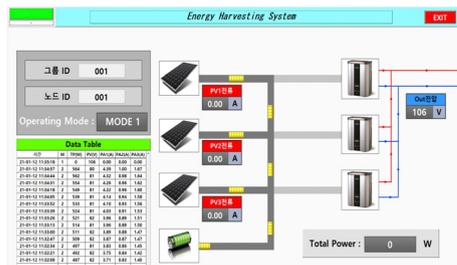


그림 10. 에너지저장장치(ESS) 충전 모드 (일출, 일몰시간)
Fig. 10. ESS charging mode (sunrise, sunset time)

- 저 전력 태양광 연계 모드
 태양광모듈 한 개 채널의 발전량은 인버터 소모 전력 보다는 높지만 인버터의 효율이 낮은 상황으로 태양광발전량이 저 전력이 발생할 수가 있다. 이러한 경우 그림 11과 같이 다수의 태양광 채널을 연계하여 높은 발전 효율을 얻을 수 있도록 하드웨어 및 알고리즘을 적용한 시스템에서 발전 상태를 확인할 수 있다.

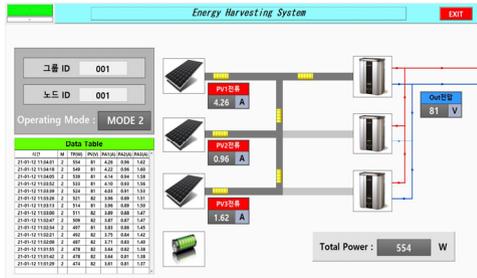


그림 11. 저전력 태양광연계 모드
 Fig. 11. Low power solar connection mode

- 일반 태양광 발전 모드

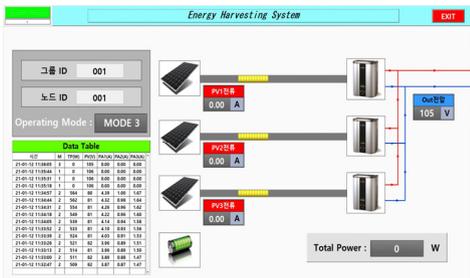


그림 12. 일반 태양광 발전 모드
 Fig. 12. Normal solar power mode

일반적으로 태양광 발전이 가능한 상태로 다채널을 연결하여 발전 하였을 때 안전사고가 발생 할 수 있는 문제가 있기에 독립적으로 발전하는 시스템을 그림 12와 같이 구성하였다. 단일 인버터를 이용하여 원활한 태양광 발전이 될 수 있도록 프로그램 및 GUI를 통해 발전 상태를 확인할 수 있다.

- 배터리 방전 모드

인버터 소모 전력이 크게 발생하는 일출, 일몰 시간 때 에너지저장장치(ESS)에 충전된 에너지(그림 10)와 개별 발전을 통해 충전된 에너지(그림 12)를 활용하여 태양광 발전을 할 수 없는 저녁시간 때에 활용할 수 있는 발전모

드이다. 지속적으로 발전이 가능하도록 프로그램 및 GUI를 그림 13과 같이 구성하였다.

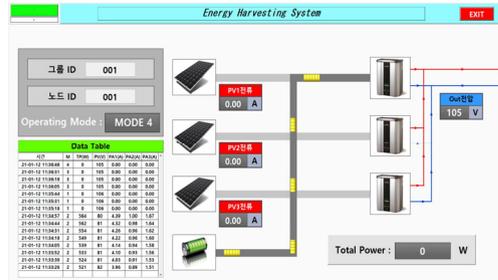


그림 13. 에너지저장장치(ESS) 방전 모드
 Fig. 13. ESS Discharge Mode

IV. 에너지 하베스팅을 통한 실험결과

“III. 낮은 일조량 구간에서 발전량 증가를 위한 에너지 하베스팅 연구”에서 서술된 “태양광발전 전력량에 따른 시스템 구성”과 “일몰, 일출, 그 밖에 환경에서 발전되는 저 전력을 이용한 시스템 구성”을 통해 개발된 시스템을 이용하여 태양광 발전 실증을 시행하였다.

본 논문을 통해 연구 개발된 제품의 에너지 하베스팅을 통한 발전량을 분석하기 위하여 표 1에서는 일반 태양광발전이 적용된 제품과 동일조건에서 일출후 2시간, 일몰전 2시간 때에 발전 증가율, 누적 발전량, 발전 증가 시간등과 관련된 실험결과를 보여주고 있다.

시험 1일차부터 시험 5일차까지 총 5일 동안 에너지 하베스팅이 적용된 제품은 비교군 대비 150~228%의 발전 증가율과 69~86분의 발전 증가분이 발생하였으며 두 제품에 따른 발전량을 그림 14에서 확인할 수 있다. 측정 결과 평균 하루 발전량이 800Wh정도 증가하였으며 1.2kWh까지 증가하는 결과를 얻었다.



그림 14. 개발시스템 및 일반 태양광전시스템의 발전량 비교
 Fig. 14. Comparison of power generation between development system and general photovoltaic system

표 1. 에너지 하베스팅이 적용된 제품과 일반 태양광발전시스템의 실험결과

Table 1. Experimental results of products to which energy harvesting is applied and general solar power generation systems

항목	시험 1일차		시험 2일차		시험 3일차		시험 4일차		시험 5일차	
	비교군	시료								
일출후 2시간 발전량(W)	190	292	355	590	183	264	74	115	22	55
일몰전 2시간 발전량(W)	251	373	273	417	153	242	7	63	74	164
합계(W)	441	665	628	1,007	336	506	81	178	96	219
발전 증가율(%)	-	+151	-	+160	-	+151	-	+219	-	+228
발전 시작 시간	AM 08:02	AM 07:43	AM 07:52	AM 07:23	AM 08:10	AM 07:41	AM 08:12	AM 07:35	AM 08:19	AM 07:44
발전 중지 시간	PM 04:52	PM 05:13	PM 04:59	PM 05:42	PM 04:44	PM 05:15	PM 4:41	PM 05:18	PM 05:05	PM 05:39
일 누적 발전량(W)	8,515	8,974	11,676	12,316	10,640	11,189	1,641	2,241	3,584	4,623
발전 증가 시간 (분)	-	86	-	72	-	60	-	74	-	69

V. 결 론

본 논문에서는 일출, 일몰, 흐린 날씨 등의 낮은 일조량 구간에서 에너지 하베스팅 기술을 적용하여 인버터 동작 최저전압 이하 및 소멸하는 전력을 회수하여 발전량을 개선하였다. 이에 대한 연구결과로 비교군 대비 150~228%의 발전 증가율과 69~86분의 발전 증가분이 발생하였으며 두 제품에 따른 발전량을 측정 결과 평균 하루 발전량이 800Wh정도 증가하였으며 1.2kWh까지 증가하는 결과를 얻었다.

따라서 태양광 발전 시스템 저전압 검출 에너지 하베스팅 기술을 적용한 차별화된 제품으로 기업의 기술경쟁력 강화와 Power Management System의 최적의 에너지 제어 수행으로 에너지효율 개선 효과를 얻을 것으로 사료된다.

References

[1] S.H. Kim, "Energy harvesting for energy efficiency," Weekly KDB Report, 2021.
 [2] D. H. Lee, H. J. Choe, Y. W. Kim, D. W. Kim, "Development of Hybrid Power System using Photovoltaic Generation and Piezoelectric Energy Harvesting Module," Journal of KIEE, vol. 70, no. 9, pp. 1413~1419, 2021. <https://doi.org/10.5370/KIEE.2021.70.9.1413>

[3] T. W. Lim, S. J. Lee and Y. M. Kim, "Smart energy harvesting for monitoring power utilities in real time," Proc. of the KIEE Conference, 1671-172, 2021.
 [4] Maria Gorlatova, Aya Wallwater, and Gil Zussman, "Networking Low-Power Energy Harvesting Devices: Measurements and Algorithms," IEEE Transactions on Mobile Computing, vol. 12, no. 9, 2013. <http://doi.org/10.1109/TMC.2012.154>
 [5] Y. H. Yoon, "Energy Harvesting Research to Increase Solar Power Generation," Journal of KIEE, vol. 70, no. 12, pp. 2064~2069, 2021. <https://doi.org/10.5370/KIEE.2021.70.12.2064>
 [6] S. H. Park, H. J. Lee and J. G. Shon, "Configuration and Efficiency Computation of the DPP System for Energy Harvesting of Renewable Energy," Journal of KIEE, vol. 67P, no. 3, pp. 137~142, 2018. <http://doi.org/10.5370/KIEEP.2018.67.3.137>

저 자 소 개

윤 용 호(정회원)



- 성균관대학교 메카트로닉스공학과 (공학박사)
- 삼성탈레스 종합연구소 전문연구원
- 현재 : 광주대학교 전기전자공학부 교수
- 주관심분야 : 전동기 제어 및 신재생 에너지

※ 이 연구는 2022년도 광주대학교 대학 연구비의 지원을 받아 수행되었음.