

다이나믹 MPPT를 적용한 최대전력지점추종 알고리즘

The New MPPT Algorithm for the Dynamic MPPT Efficiency

고석환*† · 정영석** · 소정훈*** · 황혜미**** · 주영철*****

Ko Suk-Whan*† , Jung Young-Seok**, So Jung-Hun***, Hwang Hye-mi**** and Ju Young-Chul*****

(Submit date : 2014. 9. 30., Judgment date : 2014. 10. 6., Publication decide date : 2014. 11. 24.)

Abstract : The efficiency of the maximum power point tracking(MPPT) of inverter which is used in grid-connected photovoltaic systems is changed according to dynamic environment conditions. Hence, this paper evaluates the performance of the proposed method and other MPPT algorithm on the basis of European Efficiency Test(EN50530). The modeling of MPPT algorithm is made by the Matlab & Simulink. In the result of simulation, the more control period is shorter, the more MPPT efficiency is higher. Also, the Proposed MPPT algorithm has higher performance than other MPPT algorithm with no regard to control period.

Key Words : 최대출력추종효율(Maximum power tracking efficiency), MPPT 알고리즘(Maximum power point tracking Algorithm), P & O(Perturb and Observe), 인버터(Inverter), 태양광시스템(Photovoltaic system)

기 호 설 명			
η_{MPPT}	: 다이나믹 MPPT 효율 (%)	V_{PV}	: PV의 순간 전압(V)
P_{MPPT}	: 최대 추종 전력 (W)	I_{PV}	: PV의 순간 전류(A)
		T_M	: 측정 시간(sec)

*† 고석환(교신저자) : 한국에너지기술연구원 태양광연구소
E-mail : korea19@oon.ac.kr, Tel : 051-629-6179
**정영석 : 한국에너지기술연구원 태양광연구소
***소정훈 : 한국에너지기술연구원 태양광연구소
****황혜미 : 한국에너지기술연구원 태양광연구소
*****주영철 : 한국에너지기술연구원 태양광연구소

***† Ko Suk-Whan(corresponding author) : Photovoltaic Laboratory, Korea Institute of Energy Research.
E-mail : korea19@kier.re.kr, Tel : 042-860-3282
**Jung Young-Seok : Photovoltaic Laboratory, Korea Institute of Energy Research.
***So Jung-Hun : Photovoltaic Laboratory, Korea Institute of Energy Research.
****Hwang Hye-Mi : Photovoltaic Laboratory, Korea Institute of Energy Research.
*****Ju Young-Chul : Photovoltaic Laboratory, Korea Institute of Energy Research.

1. 서 론

신재생에너지 보급이 확대되면서 전 세계적으로 태양광발전시스템이 설치되어 운영 되고 있다. 최근에는 시스템 비용 절감 방안과 효율 향상에 관한 연구가 활발히 진행되고 있으며, 소비자 측면에서는 발전효율 향상과 안정적인 운영에 대한 관심이 높아지고 있다. 일반적으로 태양광시스템 효율은 고정 일사량에서 PV 셀, 인버터, MPPT(Maximum Power Point Tracking) 알고리즘으로 분류된다. 이 중 PV 셀의 효율은 약 8 ~ 15%¹⁾, 인버터(dc-dc and/or dc/ac)는 95 ~ 98%²⁾, MPPT 알고리즘의 효율은 약 98%³⁾ 정도이다. 또한 태양광시스템은 태양 전지의 온도, 일사량에 따라서 개방전압과 단락 전류 특성이 변화된다. 국내 태양광시스템의 효율측정 방법은 지금까지 고정 일사량(1,000W/m²) 하에서 시스템 효율을 측정하고, 이를 표준 시험조건 (Standard test conditions(STC))으로 정의하고 있다. 하지만 실제로는 시스템이 설치되어 있는 현장의 환경조건, 특히 실시간으로 일사량이 변경됨에 따라 위와 같은 고정 일사량 하의 시스템효율 측정 방식에 따른 결과는 경우에 따라 많은 차이가 발생할 것이다. 실시간 변화하는 일사량에서 태양광 발전시스템의 효율을 높이기 위해서는 태양전지의 특성에 따른 MPPT 알고리즘에 의한 운전이 필요하며,^{4,5)} 수시로 급변하는 일사량 변동과 같은 동적인 환경변화에 대응하기 위한 신속한 최대 전력 추종이 동시에 이루어져야한다. 하지만, 지금까지 사용되어 온 MPPT 방식은 정적 상태에 최적화되어 있어 급변하는 일사량에 대한 대응이 원활하지 못하다는 단점을 가지고 있다. 따라서 본 논문에서는 계통 연계형 태양광 인버터의 동적 MPPT 시험조건 기준인 EN50530의 요건에 따른 MPPT 알고리즘 효율을 시뮬레이션하고 이를 개

선하기 위한 새로운 알고리즘을 제안한다.

2. EN 50530 시험 기준

EN50530 기준의 다이내믹 시험방법은 계통 연계형 PV 시스템의 MPPT 효율측정 방법에 대하여 정의하고 있다.⁶⁾ 또한, 급격한 일사량 변경에 대한 프로파일이 제공되어 다이내믹 MPPT 효율 측정이 가능하다. EN50530에서 제공하는 프로파일은 일사량 변화에 따라 다른 기울기를 갖는 Ramp 입력이 반복되는 형태이다.

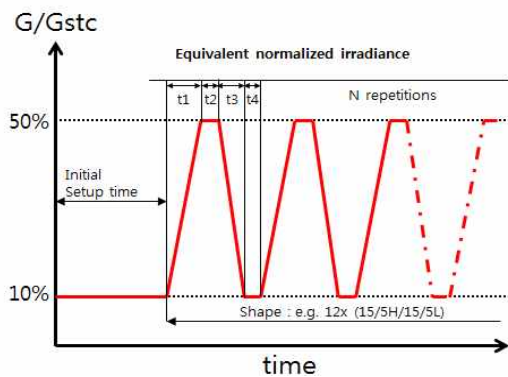


Fig 1. Test sequence for fluctuations between small and medium irradiation intensities

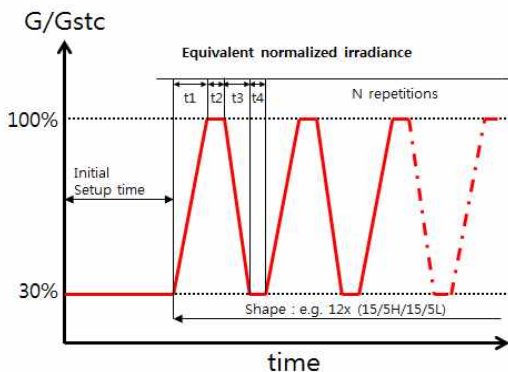


Fig 2. Test sequence for fluctuations between medium and high irradiation intensities

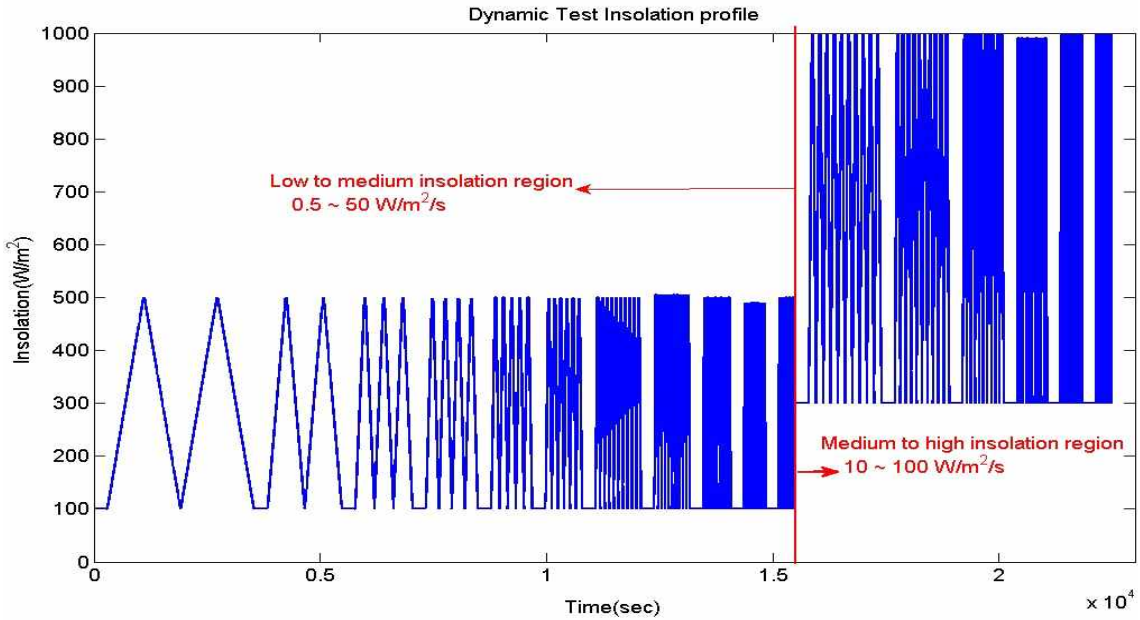


Fig 3. The Dynamic Test insolation profile.

이에 대한 시험은 그림 1과 같은 중·저 일사량 강도를 갖는 프로파일과 그림 2와 같은 고 강도 일사량 조건에서 실시되어야 한다. EN50530 기술표준에는 2가지 타입의 PV 모듈 (Crystalline silicon module과 thin-film module)에 따른 시뮬레이터의 요구사항 및 기술이 정의되어 있다. 그림 1과 그림 2는 저-중 일사량 영역(100~500 W/m²)과 중-고 일사량 영역(300~1,000 W/m²)의 일사량변화 프로파일을 나타낸다. 저-중 일사량 영역에서 기울기는 0.5~50 W/m²/s에서 변동되고 상승 구간까지 도달하는 시간은 800~8초까지 소요된다. 또한 중-고 일사량 영역에서는 기울기가 10~100 W/m²/s로 변동되고, 상승구간까지의 도달 시간은 70~7초의 프로파일을 갖는다. 다이나믹 MPPT 효율(η_{MPPT})은 각 시퀀스 동안 이상적인 이용가능에너지와 인버터의 추출에너지의 비로서 식 1과 같이 계산된다.

$$\eta_{MPPT} = \frac{\int_0^{T_M} V_{PV}(t) \times I_{PV}(t) dt}{\int_0^{T_M} P_{MPPT}(t) dt} \quad (1)$$

또한, 이 기술기준에서는 인버터의 시작과 정지 시 일사량 프로파일이 제공되어 있다. 그림 3은 본 연구에서 EN50530 기준에 따른 다이나믹 MPPT 효율 시험을 위한 완성된 일사량 프로파일을 나타낸다. 본 연구에서는 해당 프로파일을 사용하여 MPPT 효율 시험을 실시하였다.

3. MPPT 제어 알고리즘

3.1 P & O 알고리즘

P&O(Perturbation & Observation) 알고리즘은 태양전지의 전력과 전압을 비교하여 최대전력 값을 추종하는 알고리즘이다.⁷⁾ 이것은 PV 모듈의 전압과 전류를 측정하여 전력을

계산하고 이를 이전 전력과 비교하여 태양광 인버터의 출력전압(V_{ref})을 가변시키는 방식이다. P&O 알고리즘은 최대전력지점에서 전압을 감소시키는 방향과 증가시키는 방향으로 반복적으로 비교함에 따라 출력전압의 오실레이션 현상이 발생하게 된다. 그림 4는 P&O MPPT 알고리즘의 순서도를 나타낸다.

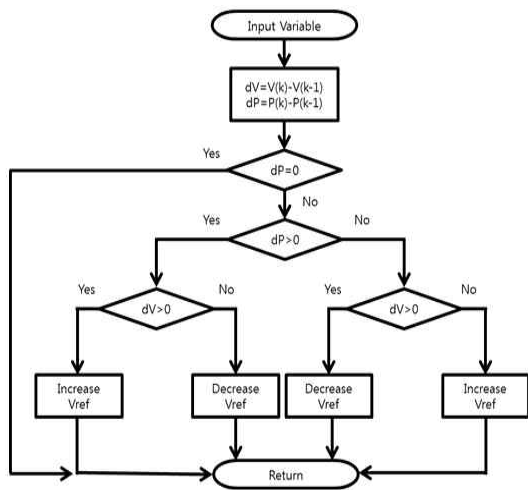


Fig 4. The P&O MPPT Algorithm

3.2 IC(Incremental Conductance) 알고리즘

P&O 알고리즘이 이전상태의 전력, 전압값과 현재상태의 값을 비교하여 MPPT를 추종하는 방식이라면, IC 알고리즘은 전력 변화량을 전압 변화량으로 나눈값($\frac{dP}{dV}$), 즉 기울기 값이 0이 되도록 MPPT를 추종하는 방법이다. 이를 식으로 다시 표현하면 식 (2)와 식 (3)과 같이 표현할 수 있다.

$$\frac{dP}{dV} = \frac{d(VI)}{dV} = \frac{I \cdot dV + V \cdot dI}{dV} = 0 \quad (2)$$

$$\frac{dI}{dV} = -\frac{I}{V} \quad (3)$$

식(3)에서 $\frac{dI}{dV} > -\frac{I}{V}$ 인 경우에는 최대전력 동작점이 P-V 특성곡선의 동작점보다 왼쪽 구간에 위치 할 것이다. 그리고 $\frac{dI}{dV} < -\frac{I}{V}$ 인 경우에는 동작점보다 오른쪽 구간에 최대전력동작점이 위치하게 된다.

3.3 제안 알고리즘

P&O 와 IC 알고리즘이 일반적으로 태양광인버터 MPPT 알고리즘으로 사용이 되는 이유는 구현이 용이하고 안정적이기 때문이다. 그러나 EN 50530 기준에 따른 급변 일사량 조건에서는 MPPT 효율이 떨어지거나 MPPT에 실패할 수 있다. 그림 3과 같은 급변 일사량 가변조건일 경우 MPPT 제어주기가 0.1초보다 높을 경우에는 MPPT를 실패하여 효율이 떨어지게 된다. 이에 따라 본 논문에서 제안하고자 하는 방식은 P&O의 이전 동작점과 비교하는 방식이 아닌, 4주기 이전 동작점의 전압과 전력 값을 이용하여 비교가 되도록 새로운 알고리즘을 제안하였다. 그림 5는 제안된 시스템 제어 블록도를 나타낸다. 가변 전압 스텝을 2스텝으로 즉 0.1V, 0.2V로 하였으며, 빠른 최대전력지점추종이 되도록 하기 위하여 IC 알고리즘의 기울기 값을 적용하여 0.1V와 0.2V의 전압스텝을 정하도록 하였다. 또한, 빠른 일사량 변동 시 전압, 전력의 값이 4주기 이상 지속적으로 상승 또는 하강할 경우에는 현재 최대출력추종 방향의 반대방향으로 동작점을 이동시켜 추종방향성을 재확인하도록 알고리즘 제안하였다. 추종방향의 재확인을 실시한 이유는 급격한 일사량 변화에 최대전력추종지점 방향이 잘못되었을 경우, 0V 또는 개방전압까지 이동 후 반대방향으로 최대전력추종지점을 재추종하는 것을 사전에 방지하고자 함이었다. 추종방향의 재확인 방법은 급격한 일사량에서만

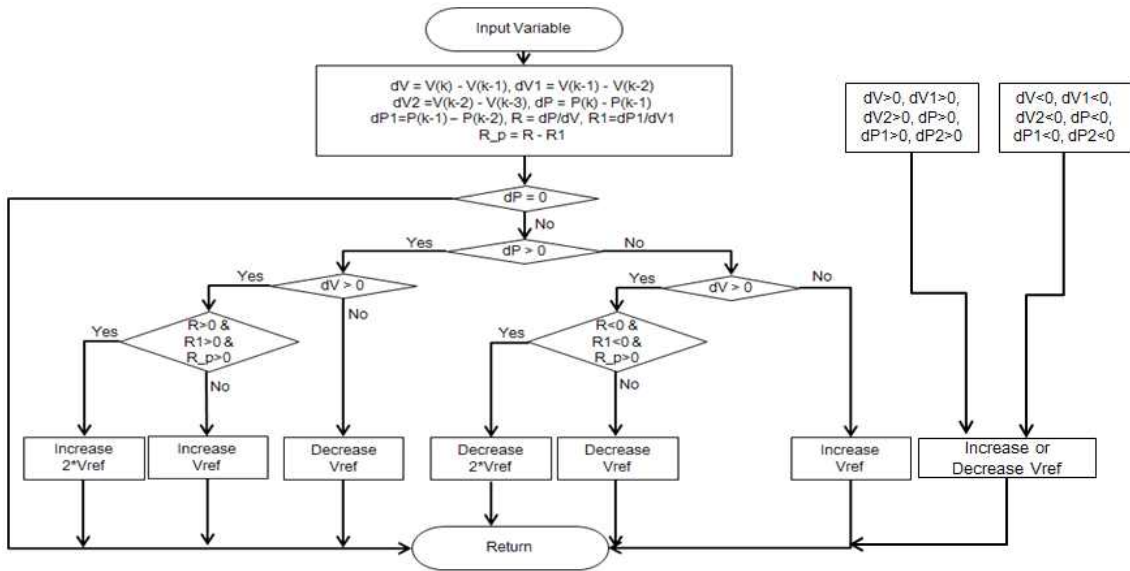


Fig 5. The Proposed MPPT Algorithm

동작하므로 평탄한 일사량 변화에서는 재확인을 하지 않아 기존의 알고리즘과 동등한 효율을 가질 수 있게 된다.

4. 시스템 모델링

4.1 태양전지 모듈 모델링

태양전지 모듈 모델링은 Matlab & Simulink를 이용하여 모델링을 하였다. 일사량에 따른 PV generator 전류/전압 특성 모델은 EN50530 Annex C의 다이오드 모델과 MPPT 성능시험을 위한 PV Generator 모델을 사용하여 모델링하였다.⁸⁾ 식 (4)는 1개 다이오드 태양전지 모듈 방정식이다.

$$I_{pv} = I_{ph} - I_0 \left(e^{\frac{U_{pv} + I_{pv}R_s}{m U_T}} - 1 \right) - \frac{U_{pv} + I_{pv}R_s}{R_p} \quad (4)$$

여기서, I_{pv} :모듈 전류, I_{ph} :태양전지전류, I_0 :다이오드 포화전류, U_{pv} :모듈 전압, U_T :온도전

압, m :다이오드 계수, R_s :직렬저항, R_p : 병렬저항을 나타낸다. 태양전지 모델링에 사용된 태양전지모듈의 특성은 표 1과 같다. 표 1은 태양전지모듈의 표준 시험조건(STC)의 특성을 나타낸다. 또한 그림 6과 그림 7은 일사량 가변상태에서 태양전지모듈의 특성 그래프를 나타낸다.

Table 1. The static Characteristics of solar module

최대 전력(P_{max})	200 W
MPP 전압(V_{mp})	24.5 V
MPP 전류(I_{mp})	8.16 A
단락전류(I_{sc})	8.7 A
개방전압(V_{oc})	30.8 V

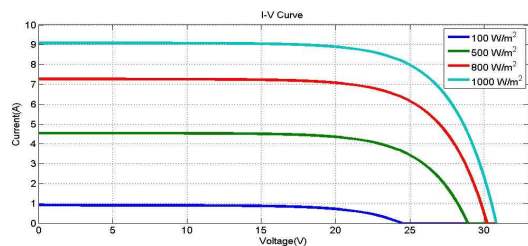


Fig 6. I-V characteristics of PV under changing insolation

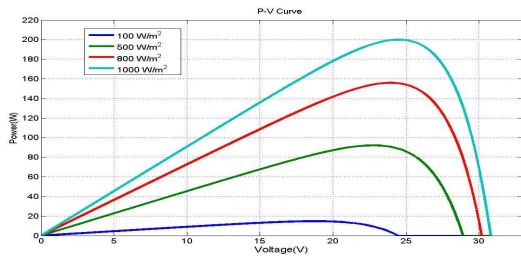


Fig 7. P-V characteristics of PV under changing insolation

4.2 시스템 모델링

다이나믹 MPPT 시뮬레이션을 위한 시스템 모델링은 입력데이터가 일사량가변 시계열 데이터이므로 시스템 모델링은 이산시스템으로 모델링을 하였다. 그림 8은 P&O 알고리즘을 적용한 시스템 모델링이며, 그림 9는 제안된 시스템의 모델링을 나타낸다. PV 시뮬레이터는 입력된 일사량 값에 따른 모듈의 전압, 전력, 최대 추종전력 값을 출력값으로 갖는다. 그림 9의 제안된 시스템에서는 기존의 P&O 알고리즘의 2점 비교방식이 아닌 4점 비교방식을 적용되었으며, 빠른 추종을 위하여 IC 알고리즘의 기술기($\frac{dP}{dV}$)값에 따른 전압 변동값(dV)을 2단 스텝 개인 값으로 적용하였다.

5. 시뮬레이션 결과 및 고찰

5.1 제어주기에 따른 특성 분석

EN50530 MPPT 성능시험 프로파일에서는 가변일사량 기울기 값이 급격히 변환되는 구간이 존재한다. 이런 구간에서는 제어 주기 값이 느릴 경우 추종효율이 떨어질 가능성이 있다. 일반적으로 상용 태양광 전력변환시스템의 MPPT 제어주기는 0.5초에서 3초까지 다양하게 사용되어지고 있다. 본 시뮬레이션은 일반적으로 많이 사용되고 있는 P&O 알고리즘을 이용하여 제어주기에 따른 전압 및 전력 효율

을 분석·고찰하였다.

Table 2. MPPT efficiency for control period of P&O

control period	MPPT efficiency(%)
0.1 Sec	98.79
0.5 Sec	95.18
1 Sec	95.33

표 2는 P&O MPPT 알고리즘의 제어주기를 변화하였을 때 MPPT 변환효율을 나타낸다. EN50530의 다이나믹 MPPT 성능시험을 위해서는 제어주기가 빠르게 동작되었을 때 효율이 높게 나온 것을 확인할 수 있다. 그림 10과 그림 11은 P&O MPPT 알고리즘 주기에 따른 전압 및 전력 추종그래프이다. 일사량이 일정한 구간에서 제어주기가 빠른 경우 전압 오실레이션이 발생하여 효율이 저감된다. 상승 또는 하강구간에서는 제어주기가 빨라져야 MPPT 동작점을 잘 추종되는 것을 확인할 수 있다.

5.2 MPPT 알고리즘에 따른 특성 분석

5.1 절에서는 P&O 알고리즘의 제어주기에 따른 효율비교 시뮬레이션을 분석하였다. 본 절에서는 알고리즘에 따른 다이나믹 MPPT 효율성능 시뮬레이션을 수행하였다. 시뮬레이션 수행을 위한 알고리즘은 P&O 알고리즘, IC 알고리즘, 제안된 알고리즘이다. 시뮬레이션의 제어주기는 0.1초에서 2초까지 변경하여 적용하였으며, P&O 및 IC알고리즘의 전압 개인은 0.1V로 하여 시뮬레이션을 수행하였다. 이때 제안된 알고리즘의 전압 개인은 그림 5의 블록 다이어그램과 같이 2스텝(0.1V, 0.2V)으로 적용하여 시뮬레이션을 수행하였다. 그림 12는 MPPT 알고리즘에 따른 추종전압 시뮬레이션 결과다

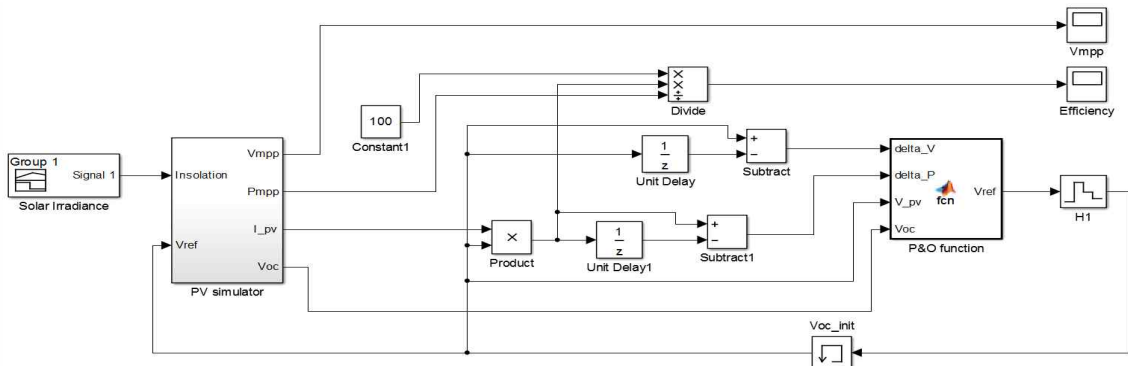


Fig. 8 The P&O MPPT Modeling

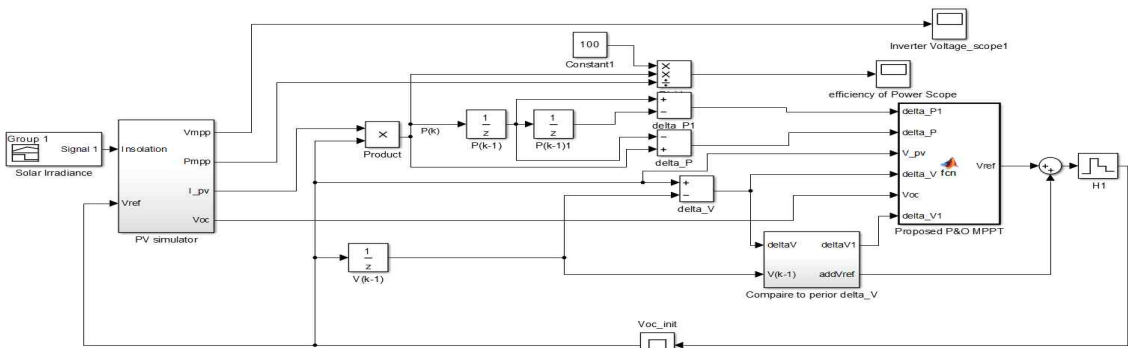


Fig. 9. The Proposed MPPT Modeling

P&O 와 IC 알고리즘의 경우 이상적인 추종전압과 비교하여보면, 완만한 일사량 변화 구간에서는 최대전력지점의 전압을 추종하다가 급변구간에서는 최대전력지점 전압을 추종하지 못하는 것을 확인할 수 있으며, 제안된 알고리즘은 급변구간에서도 최대전력지점의 전압을 적절히 추종하는 것을 시뮬레이션을 통하여 확인할 수 있었다. 그림 13은 제어주기 2초일 때 각 MPPT 알고리즘의 효율을 시뮬레이션 시간에 따라 나타내고 있다. P&O 방식과 IC 방식은 효율이 최대 0%까지 떨어지고 이후 급격한 변화에는 더 이상 효율 변화가 0%까지 변경되지 않았다. 이것은 최대전력 동작점을 추종하기 전에 이미 일사량

변화가 없는 구간에 이르렀기 때문이다. 즉 MPPT 효율이 0%까지 떨어져 사실상 MPPT를 실패하기 이전에 일사량이 일정한 구간에서 먼저 도달하게 되고 그 상태에서 최대전력 동작점을 찾았기 때문이다.

표 3은 그림 3의 일사량 프로파일을 이용해 제어주기에 따른 MPPT 알고리즘별 시뮬레이션 효율의 결과 값을 나타낸다. 표에서 보는 바와 같이, 제안된 알고리즘은 기존의 MPPT 알고리즘보다 높은 효율 값을 갖는 것을 확인할 수 있었다. 제어주기가 길어짐에 따른 효율의 감소 차이도 타 알고리즘에 비해 우수한 특성을 나타내었다. 또한, P&O 알고리즘과 IC 알고리즘에서는 순간적인 일사량 변화에 따라 MPPT

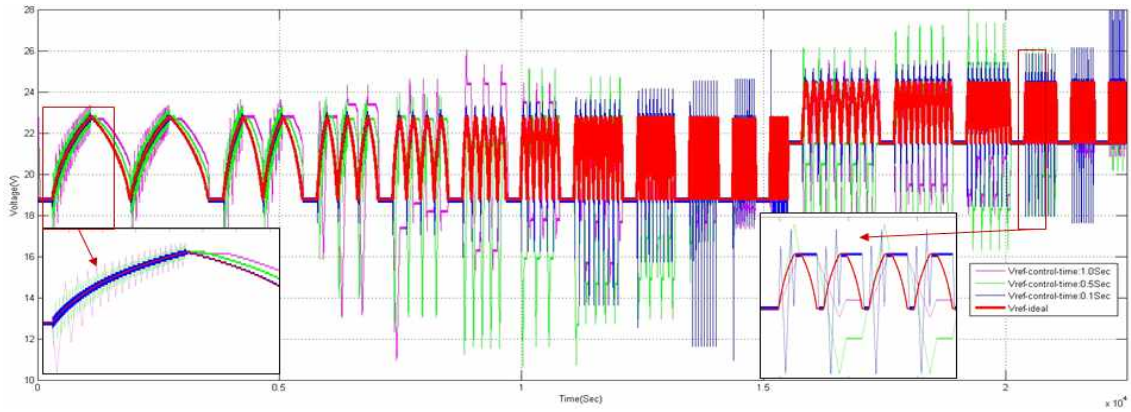


Fig 10. The result of simulation for reference voltage by control period of P&O Algorithm(Control period : 0.1Sec)

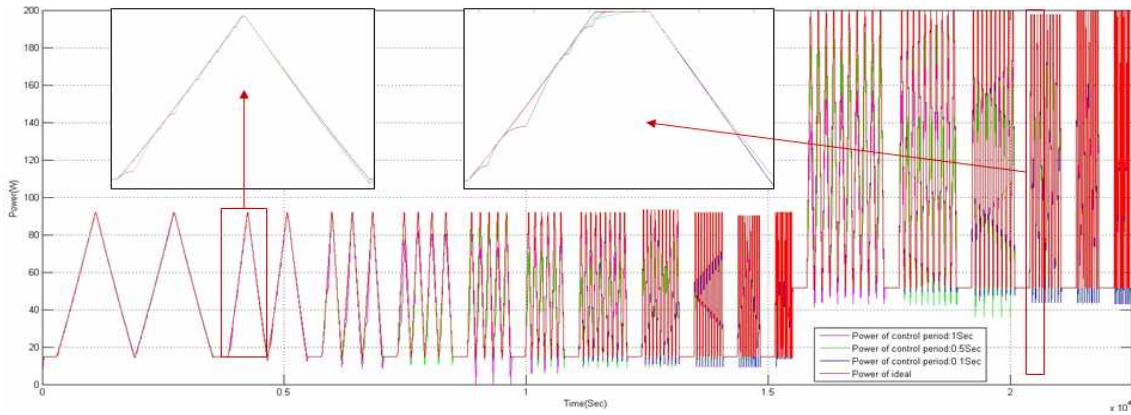


Fig 11. The result of simulation for power by control period of P&O Algorithm(Control period : 0.1Sec)

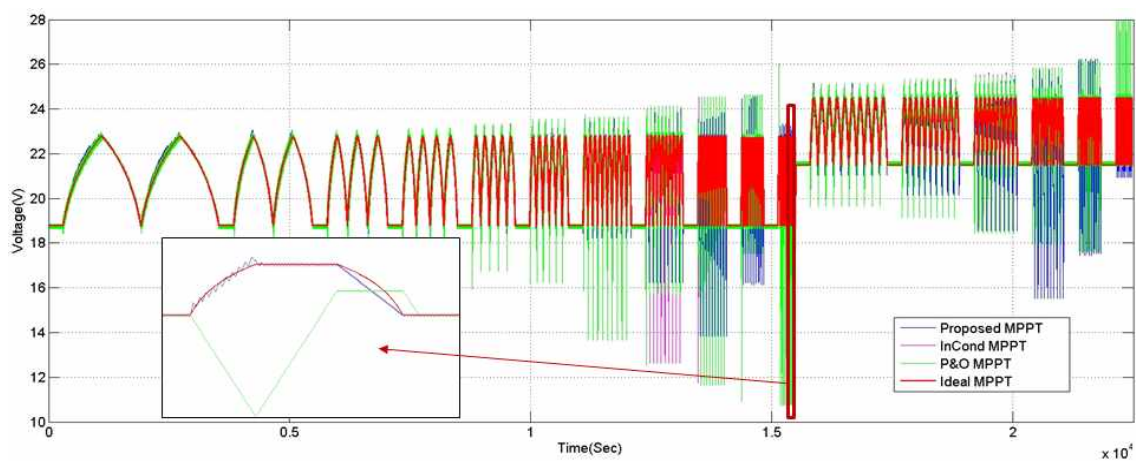


Fig 12. The result of simulation for reference voltage by proposed MPPT Algorithm(Control period : 0.1Sec)

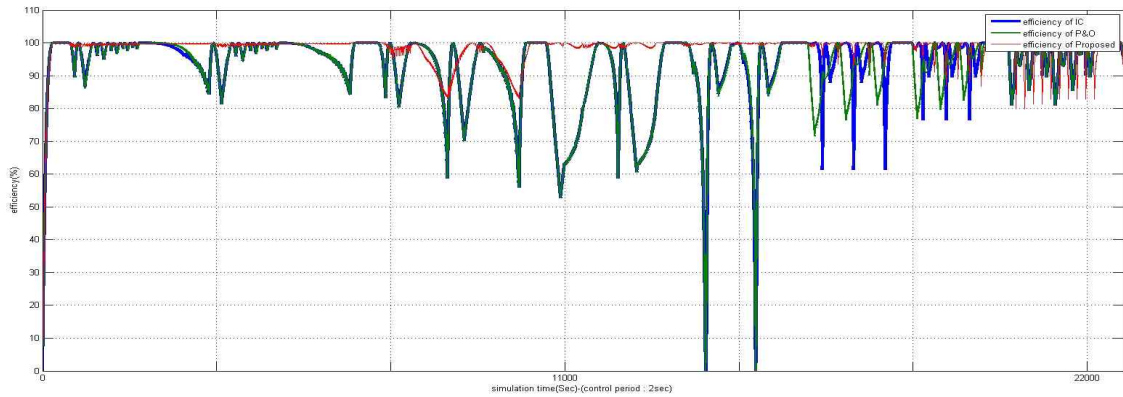


Fig 13. The result of simulation for efficiency

추종 방향의 오류로 인한 순간 효율 값이 최소 50%까지 감소되는 것을 시뮬레이션을 통해 확인할 수 있었다.

상승/하강 시에 최대전력추종 방향 확인 알고리즘이 추가되어야 한다.

후 기

본 연구는 산업통상부 산하 (재)충청광역경제권 선도산업지원단의 광역경제권 선도산업 육성사업에 의해 수행 되었습니다.(과제번호 : R0001823)

참 고 문 헌

1. Wasynczuk, O., Dynamic Behavior of a Class of Photovoltaic Power Systems. IEEE Trans Power Ap. Sys, 1983
2. Pallab Midya, Philip T.Krein, Robert J. Turnbull, Robert Reppa, Jonathan Kimball, Dynamic maximum power point tracker for photovoltaic applications. In: Power Electronics Specialists Conference, PESC '96 Record, 27th Annual IEEE, 1996.
3. Ishaque, K., Salam, Z., Amjad, M., Mekhilef, S., An improved particle swarm optimization (PSO)-based MPPT for PV with reduced steady state oscillation. IEEE Trans Power Electron, 27(8):3627 - 8, 2012
4. Guan-Chyun Hsieh, Hung-I, Hsieh, Cheng-Yuan

Table 3. MPPT efficiency for Control period

Control period (Sec)	MPPT efficiency(%)		
	P&O	IC	Proposed
0.1	98.79	98.75	99.54
0.5	95.18	95.43	99.15
1	95.33	95.43	99.01
2	94.87	95.24	98.57

6. 결 론

본 연구에서는 EN50530 기준에 따른 다이나믹 MPPT에 적합한 새로운 알고리즘을 제안하고 효율분석을 실시하였으며 기존 알고리즘의 문제점과 비교분석을 통하여 고찰한 결과는 다음과 같다.

- (1) EN50530 일사량 가변프로파일과 같은 급격한 변화에 있어서, 제안된 알고리즘은 타 알고리즘보다 제어주기별로 다르지만 0.25% ~ 3.7% 높은 효율을 나타내었다.
- (2) 급변하는 일사량 조건하에서 제어기가 MPPT를 실패하는 것을 방지하기 위하여 지속적

- Tsai, Chi-Hao Wang, Photovoltaic Power-Increment -Aided Incremental- Conductance MPPT With Two-Phased Tracking, Power Electronics, IEEE Transactions on. Vol.28 2013, pp 2895-2911
5. Barchowsky, A., Parvin, J.P., Reed, G.F., Korytowski, M.J., Grainger, B.M., A Comparative study of MPPT methods for distributed photovoltaic generation, 2012 IEEE PES(Innovative Smart Grid Technologies), pp 1-7, 2012
 6. Overall efficiency of grid connected photovoltaic inverters, BS EN 50530:2010
 7. Mohamed A. Eltawil, Zhengming Zhao, MPPT techniques for photovoltaic applications, Renewable and Sustainable Energy Reviews, Vol 25. pp 793-813, 2013
 8. Volker Quaschnig, "Simulation der Abschattungsverluste bei solarelektrischen System", Dissertation Technische Universitat Berlin, 1996