



저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.



변경금지. 귀하는 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공할 수 없습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

[Disclaimer](#)

공학석사학위논문

태양광 발전시스템의 전력 진동 감소를 위한
개선된 CPG 제어 기법



2024년 2월

국립부경대학교대학원

전기공학과

엄부현

공학석사학위논문

태양광 발전시스템의 전력 진동 감소를 위한
개선된 CPG 제어 기법

지도교수 고영종

이 논문을 공학석사 학위논문으로 제출함.

2024년 2월

국립부경대학교 대학원

전기공학과

엄부현

엄부현의 공학석사 학위논문을 인준함.

2024년 2월 16일



위 원 장 공학박사 노의철 (인)

위 원 공학박사 김인동 (인)

위 원 공학박사 고영종 (인)

목 차

Abstract	vi
제 1 장 서 론	1
제 2 장 태양전지 특성	6
2.1 태양전지 수학적 모델링	6
2.2 태양전지 출력특성	9
제 3 장 기존의 스텝-듀티 기법	11
3.1 고정형 스텝-듀티 기법	12
3.2 적응형 스텝-듀티 기법	16
제 4 장 제안하는 스텝-듀티 기법	20
4.1 개선된 스텝-듀티 기법	20
4.2 제어기 구성	25
4.3 스텝-듀티 이득 계수의 영향	28
제 5 장 시뮬레이션 및 실험	30
5.1 시뮬레이션 검증	30
5.1.1 태양광 발전시스템의 제어 구조	31
5.1.2 좌측 CPP에 대한 전력제한값 변화 시뮬레이션 결과	33
5.1.3 좌측 CPP에 대한 일사량 변화 시뮬레이션 결과	36
5.1.4 우측 CPP에 대한 전력제한값 변화 시뮬레이션 결과	39

5.1.5 우측 CPP에 대한 일사량 변화 시뮬레이션 결과	41
제 6 장 결론	44
참고 문헌	46
감사의 글	49



표 차 례

표 5.1 태양광 패널 파라미터	32
표 5.2 부스트 컨버터 파라미터	32
표 5.3 좌측 CPP에 대한 전력제한값 변화 시뮬레이션 조건표	33
표 5.4 좌측 CPP에 대한 일사량 변화 시뮬레이션 조건표	36



그림 차례

그림 1.1	글로벌 태양광 설치량 현황 및 전망(2020~2030)	2
그림 2.1	태양전지 증가회로도	6
그림 2.2	일사량에 따른 태양광 패널 출력전류-출력전압 특성곡선	9
그림 2.3	일사량에 따른 태양광 패널 출력전력-출력전압 특성곡선	10
그림 3.1	기존의 문헌들에서 사용된 태양광 발전시스템의 제어 순서도	11
그림 3.2	고정형 스텝-듀티 기법의 상태 판단 계수 선정 순서도	13
그림 3.3	작은 스텝-듀티값으로 인해 느린 추종속도를 갖게 되는 경우	15
그림 3.4	큰 스텝-듀티값으로 인해 전력 차이 허용값에 속하지 않는 경우	15
그림 3.5	태양광 패널의 동작점에 따른 적응형 스텝-듀티 기법 원리	19
그림 4.1	MPPT 제어의 정상상태인 경우	22
그림 4.2	정상상태 및 과도상태 판별 알고리즘 순서도	22
그림 4.3	기울기 판단 계수 β 를 판단하는 알고리즘 순서도	24
그림 4.4	제안한 개선된 스텝-듀티 기법을 적용한 태양광 발전시스템의 전체적인 제어 알고리즘 순서도	26
그림 4.5	P&O 기법을 이용한 MPPT 제어 알고리즘 순서도	27

그림 4.6 CPP 위치 선정이 가능한 CPG 제어 알고리즘 순서도	27
그림 4.7 제안한 기법에서 이득 계수의 영향	29
그림 5.1 태양광 발전시스템의 제어 구조	31
그림 5.2 태양광 발전시스템의 제어 시뮬레이션 회로도	33
그림 5.3 좌측 CPP에 대한 전력제한값 변화 시뮬레이션 결과	34
그림 5.4 좌측 CPP에 대한 일사량 변화 시뮬레이션 결과	37
그림 5.5 우측 CPP에 대한 전력제한값 변화 시뮬레이션 결과	40
그림 5.6 우측 CPP에 대한 일사량 변화 시뮬레이션 결과	42



Improved CPG Control Technique for Reducing Power Oscillations in
Photovoltaic Power Generation System

Bu Hyeon Eom

*Department of Electrical Engineering, The Graduate School,
Pukyong National University*

Abstract

Photovoltaic(PV) power plants typically use maximum power point tracking(MPPT) control to maximize power supply. However, if the output power from photovoltaic generation surpasses the acceptable capacity of the load, it can lead to issues such as overload and overvoltage. Consequently, a constant power generation(CPG) control is required to limit the PV output power to a certain value. In this case, the combined operation of MPPT and CPG is necessary, with optimized control in both modes.

Conventional CPG control imposes limitations on the selection of constant power points, leading to suboptimal control depending on the operational points of photovoltaic panels. To ensure the high-efficiency operation of photovoltaic systems, an optimal control technique is crucial, capable of adapting to variations in the operational points of the photovoltaic panels. This facilitates a swift transition from transient state to steady state while enhancing stability by maintaining minimal power oscillations upon reaching the steady state.

In this paper, an improved CPG control algorithm is proposed, featuring fast response speed depending on the operation mode and low power oscillation for both MPPT and CPG operations. The proposed control algorithm can select the operating points and

obtain fast tracking speed in transient state as well as low power oscillation in steady state. Additionally, optimized operation is achievable by providing low power oscillation not only in MPPT mode but also in CPG mode. The performance of the proposed control algorithm has been validated through simulation.



제 1 장 서 론

현대 생활은 화석연료에 크게 의존하고 있다. 2023년 6월 에너지 연구소(EI)에서 발표한 세계 에너지 연례 통계보고서(Statistical Review of World Energy)에 따르면 재생에너지의 발전량이 늘었지만 화석연료가 여전히 전체 에너지 소비량의 82%를 차지하고 있다는 내용을 발표했다. 태양광과 풍력 등 총 266기가와트로 재생에너지 용량이 최대로 증가했음에도 불구하고 대부분의 에너지 수요를 석유, 천연가스 그리고 석탄 등 화석연료로 충당한 것이다. 이에 따라, 전 세계 에너지 관련 온실가스 배출량은 0.8% 증가한 39.3GtCO₂e(이산화탄소 환산량)인 것으로 나타났다. 이러한 화석연료는 한정된 자원이며, 화석연료가 연소될 때 배출되는 이산화탄소와 질소산화물로 인한 지구 온난화 및 환경 오염을 일으키는 주된 원인이다. 화석연료 사용 증가를 방지하기 위해 전 세계적으로 신재생에너지에 대한 투자가 증대되고 있으며 신재생에너지 개발에 대한 관심이 급증하고 있다 [1]-[2].

2022년 12월 IEA(International Energy Agency)에서 발표한 연례 보고서(Renewables 2022)에 따르면 글로벌 에너지 위기는 재생에너지 신규 설치를 가속화하고 있으며, 향후 5년 동안 글로벌 재생에너지 용량이 거의 두 배로 증가해 가장 큰 전력 생산원인 석탄을 추월할 전망이라고 발표했다 [3]. 또한, 글로벌 태양광 설치량 전망은 2024년 400GW, 2027년 530GW 그리고 2030년에는 680GW로 꾸준한 성장세를 예상하고 있다. 그림 1.1은 글로벌 태양광 설치량에 대한 현황 및 전망(2020~2030)을 나타내고 있다 [4].

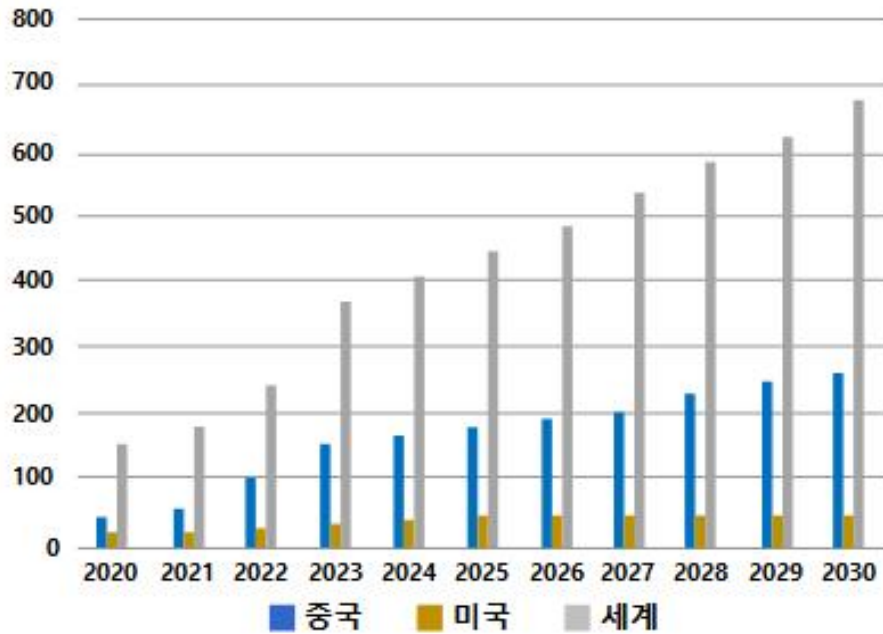


그림 1.1 글로벌 태양광 설치량 현황 및 전망(2020~2030) [5]

신재생에너지는 친환경적이며 해외 수입 의존도를 낮출 수 있고 에너지원이 고갈될 우려가 없는 장점을 가지고 있으며 바이오매스, 수력, 해양에너지, 풍력 그리고 태양광 등을 주된 에너지원으로 사용한다.

바이오매스에너지는 원료 확보를 위해 넓은 면적의 토지가 필요하며 산림이 고갈될 우려가 있다. 수력에너지는 저수지 건설 시 지형을 침수시켜야 하므로 생태계를 파괴할 수 있다. 해양에너지는 에너지 밀도가 작고 해양 생태계를 파괴할 수 있다. 풍력에너지는 연중 바람이 부는 곳을 찾기가 어려우며 소음이 발생한다는 문제가 있다. 그러나 태양광에너지는 햇빛이 비치는 곳이라면 설치가 가능하여 비교적 장소 제약이 적으며 소음과 진동이 적다. 또한, 한국수출입은행에서 발표한 2023년 상반기 태양광산업 동향에 따르면 태양광 주요 제품인 폴리실리콘의 가격은 2023년 7월 기준

\$7.85/kg로 2022년 8월 고점(\$39/kg) 대비 79.9% 급락되었다. 또한, 실리콘 웨이퍼의 가격은 2023년 7월 기준 \$0.48/piece로 2022년 7월 고점(\$1.31/piece) 대비 63.1% 하락되었다. 이로 인해, 태양광 모듈 제조비용이 하락하게 되었고 태양광 수요가 급증하며 신재생에너지원 중 차세대 발전 시스템으로 각광받고 있다.

태양광에너지는 태양광 패널을 이용하여 빛 에너지를 전기로 만들어낸다. 태양광 패널의 출력특성은 일사량과 온도에 의해서 변하는 특징이 있다. 즉, 태양광 패널은 고유한 비선형 특성을 가지므로 최대전력점(MPP: Maximum Power Point)을 추종하기 위한 제어가 필요하며 이러한 제어를 최대전력점추종(MPPT) 제어라 한다.

태양광에너지가 계통에 연결되어 발전하는 계통 연계 태양광 시스템은 출력전력이 계통의 수용 가능 전력을 초과하게 되면 계통의 안정도를 위협하는 문제가 있다. MPPT 제어는 태양광 패널의 최대전력만을 출력하므로 태양광 시스템의 출력전력이 계통의 수용 가능 전력을 초과할 가능성이 있다. 따라서 태양광 발전시스템에서 계통의 안정도를 보장할 수 있는 제어도 필요하며 이러한 제어를 정전력발전(CPG: Constant Power Generation) 제어라 한다. 즉, 태양광 패널은 출력전력이 계통의 수용 가능 전력보다 낮을 때에는 MPPT 제어가 수행되고, 반대의 경우에는 CPG 제어가 수행되어야 한다.

MPPT 제어기법은 P&O(Perturbation and Observation) 기법, IncCond(Incremental Conductance) 기법, CV(Constant Voltage) 기법, Beta 기법 등 많은 문헌에서 제안되어 왔다. 대부분의 문헌들은 태양광 패널에서 최대전력추출에 중점을 두고 있지만, 태양광 패널의 실제적인 동작에선 출력전력을 특정한 전력값으로 제어해야 하는 경우가 있다. 예를 들면, 지속적인 전력공급을 필요로 하는 태양광 발전소에서 그리드 코드 규

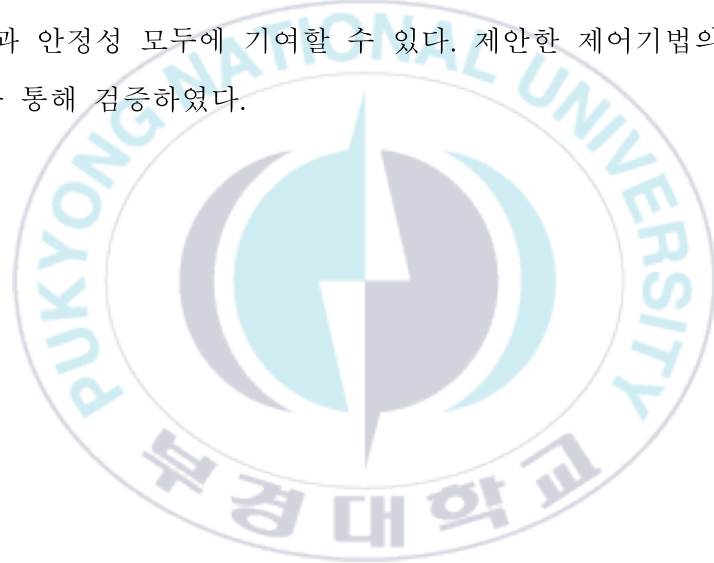
정을 만족시키기 위해 특정한 전력값으로 제어해야 한다. 이때, 그리드 코드 규정은 태양광 발전소의 지속적인 최대전력 공급으로 인해 전력망에 과부하 및 과전압이 걸리게 되어 일어나는 고장 문제를 방지하는 것을 목표로 한다 [6]. 따라서 전력제한 시 빠른 추종속도를 가질 수 있고 정상상태에서 작은 전력진동을 갖는 제어 기법에 대한 연구가 태양광 발전에 필수적이다. 본 논문에서는 MPPT 제어도 가능하며 빠른 추종속도와 작은 전력진동을 가질 수 있는 CPG 제어 기법에 대해 연구한다.

대표적인 CPG 제어는 전력 루프 기법, 고정형 스텝-듀티 기법, 적응형 스텝-듀티 기법들이 문헌에서 제안되어 왔다. 전력 루프 기법은 PI 제어기로 구성된 전력 루프를 이용하여 CPG 제어를 수행한다. 비교적 간단한 제어 구조를 가지지만 CPG 제어 시 우측 CPP(Constant Power Point)만 추종가능하다는 단점을 가지고 있다. 우측 CPP는 작은 전압변동으로 큰 전력변동을 유발하므로 급격한 일사량 변화에 대응하지 못한다 [7].

고정형 스텝-듀티 기법과 적응형 스텝-듀티 기법은 P&O(Perturb and Observe) [8] 기법을 기반으로 CPG 제어를 수행한다 [9]-[10]. P&O 기법은 태양광 패널의 동작점을 주기적으로 변화시키면서 태양광 패널의 출력 전류 및 전압을 통해 전력을 계산한다. 계산된 전력의 크기 변화를 통해 원하는 출력지점을 추종하도록 한다. 이때, 동작점의 변화는 선정된 스텝-듀티값만큼 변화된다. 스텝-듀티값이 클 때에는 빠른 속도로 MPP 및 CPP를 추종 가능하나 정상상태에서 큰 전력진동을 가진다. 반면, 스텝-듀티값이 작을 때에는 정상상태에서 작은 전력진동을 가져 안정성을 갖게 되지만 정상상태가 아닌 과도상태에서 느린 추종 속도를 가진다. 고정형 스텝-듀티 기법과 적응형 스텝-듀티 기법은 좌측 또는 우측 CPP를 모두 추종할 수 있으며 빠른 추종속도와 전력진동 저감을 위해 상태 판단 계수를 이용하여 스텝-듀티값을 선정할 수 있지만 태양광 패널의 동작점이 변화되면

최적의 스텝-듀티값을 선정하지 못하는 단점이 있다. 태양광 패널의 고효율 동작을 위해선 태양광 패널의 동작점의 변화에 따라 알맞는 스텝-듀티값을 선정할 수 있는 제어가 필요하다 [11]-[12].

본 논문에서는 스텝-듀티값에 따라 속응성과 안정성이 상호 양립하는 단점을 보완하기 위한 개선된 제어기법을 제안한다. 제안하는 제어기법은 CPP 동작 지점을 선정할 수 있으며 과도상태 및 정상상태에 따라 최적의 스텝-듀티값을 선정할 수 있다. 제안하는 제어기법은 과도상태 시에는 빠른 추종 속도를 가지고, 정상상태 시에는 작은 전력진동을 갖게 할 수 있어 속응성과 안정성 모두에 기여할 수 있다. 제안한 제어기법의 성능은 시뮬레이션을 통해 검증하였다.



제 2 장 태양전지 특성

2.1 태양전지 수학적 모델링

태양전지는 p-n 접합으로 이루어지며 광기전력 효과를 이용하여 태양에너지를 전기에너지로 변환시키는 반도체 소자이다. 여기서 광기전력 효과란 반도체의 p-n 접합부나 정류작용이 있는 금속과 반도체의 경계면에 빛을 입사시킬 때 빛에 의하여 전자-정공 쌍이 발생하며 공핍층 내에 전계로 인하여 전자는 n형 영역으로 이동하고 정공은 p형 영역으로 이동한다. 이동된 전자-정공으로 인하여 열평형 상태에 비해 캐리어 농도가 상승하여 p형 반도체와 n형 반도체 사이의 농도 차이에 따라 기전력이 발생하는 효과이다.

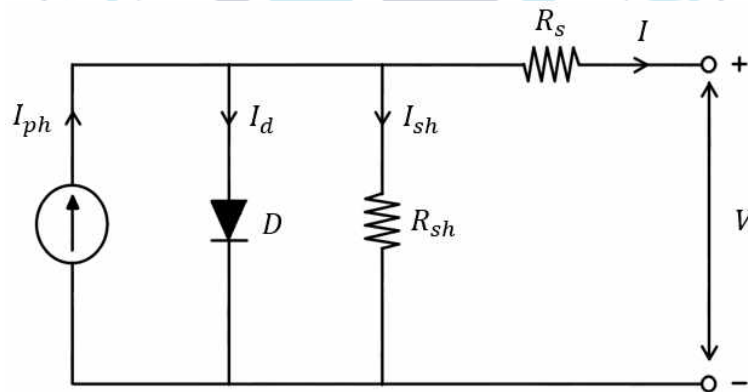


그림 2.1 태양전지 등가회로도

태양전지는 한 개의 이상적인 다이오드와 I_{ph} 의 크기를 갖는 정전류원 (Constant Current Source)으로 구성되어 있다. 하지만 실제로는 이상적인

다이오드를 제작하는 것이 불가능하므로 접촉저항 및 표면층의 시트 (Sheet)저항 등을 나타내는 직렬저항 R_s 와 병렬저항 R_{sh} 이 존재한다.

그림 2.1은 태양전지의 등가회로를 나타낸다. 태양전지의 출력전류는 그림 2.1의 등가회로를 기반으로 식 (2.1)과 같이 나타낼 수 있다.

$$I = I_{ph} - I_o \times \left[\exp\left(\frac{q(V + IR_s)}{nKT}\right) - 1 \right] - I_{sh} \quad (2.1)$$

여기서, n = 다이오드 이상계수, q = 전하량[C], K = 볼츠만상수, T = 태양전지 절대온도(273+섭씨온도)

식 (2.1)을 통해 태양전지의 출력은 일사량에 따라 변화되는 것을 알 수 있으며, 식 (2.1)을 구성하는 수식은 다음 식과 같이 표현할 수 있다.

$$I_{ph} = [I_{sc} + k_i(T - 298)] \times \frac{G}{1000} \quad (2.2)$$

$$I_o = I_{rs} \left(\frac{T}{T_n}\right)^3 \exp\left[\frac{qE_{g_0}(1/T_n - 1/T)}{nK}\right] \quad (2.3)$$

$$I_{sh} = \frac{V + IR_s}{R_{sh}} \quad (2.4)$$

여기서, I_{ph} = 광전류 k_i = 전류 온도 계수[A/K], G = 조사[W/m²], I_o = 포화전류, E_{g_0} = 에너지밴드갭, T_n = 태양전지 기준 온도, I_{sh} = 병렬 저항에 흐르는 전류

병렬저항은 반도체에서 전해질로 전류가 흐를 때 관여한다. 병렬저항이

작으면 누설전류가 커지고 개방전압을 낮추게 된다. 즉, 최대 전류를 부하로 보내기 위해 매우 높은 병렬저항이 요구된다. 직렬저항은 전극, 기판 및 반도체에 내재된 저항을 포함하고 있다. 직렬저항이 크면 단락전류를 감소시킨다. 그러므로 태양전지를 통한 전류 감소를 최소화하기 위해 낮은 직렬저항이 요구된다 [13]. 그러므로, 병렬저항을 ∞ 로 가정하고 직렬저항을 0으로 가정하여 식 (2.1)을 식(2.5)와 같이 간략화 시킬 수 있다.

$$I = I_{ph} - I_o \times \left[\exp\left(\frac{qV}{nKT}\right) - 1 \right] \quad (2.5)$$

태양광 패널은 여러 개의 태양전지를 직렬 및 병렬 연결하여 구성된다. 식 (2.5)는 태양전지 단일 구조에 대한 수식이며, 이 수식에 태양전지 직렬 및 병렬 연결 개수를 고려한다면 식(2.6)과 같이 나타낼 수 있다.

$$I = N_p \left[I_{ph} - I_o \times \left\{ \exp\left(\frac{qV}{nKT N_s}\right) - 1 \right\} \right] \quad (2.6)$$

원하는 태양광 패널의 출력 사양에 맞게 직렬 및 병렬 연결 개수를 선정해야 하며, 직렬 및 병렬 연결 개수는 태양광 패널의 개방전압 V_{oc} 과 단락전류 I_{sc} 를 결정한다. 개방전압은 태양광 패널의 출력전류 값이 0일 때이므로 식(2.7)과 같이 나타낼 수 있다.

$$V_{oc} = \frac{nKT N_s}{q} \ln\left(\frac{I_{ph}}{I_o} + 1\right) \quad (2.7)$$

단락전류는 태양광 패널의 개방전압 값이 0일 때이므로 식 (2.8)과 같이

나타낼 수 있다.

$$I_{sc} = N_p I_{ph} \quad (2.8)$$

2.2 태양전지 출력특성

태양전지의 수학적 모델링으로부터 얻은 식들을 통해서 일사량에 따른 태양광 패널의 출력 특성 그래프를 얻을 수 있다. 그림 2.2는 일사량 변화에 따른 태양광 패널의 출력전류-출력전압 특성곡선을 나타내며, 그림 2.3은 일사량 변화에 따른 태양광 패널의 출력전력-출력전압 특성곡선을 나타낸다. 그림 2.2 및 그림 2.3을 통해 태양광 패널의 출력특성은 비선형적임을 알 수 있다. 이러한 특성 때문에 태양광 패널은 MPP를 가지게 된다.

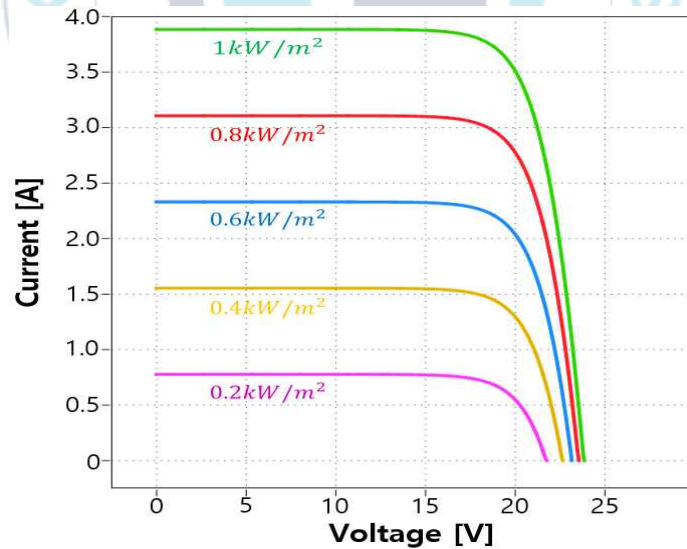


그림 2.2 일사량에 따른 태양광 패널
출력전류-출력전압 특성곡선

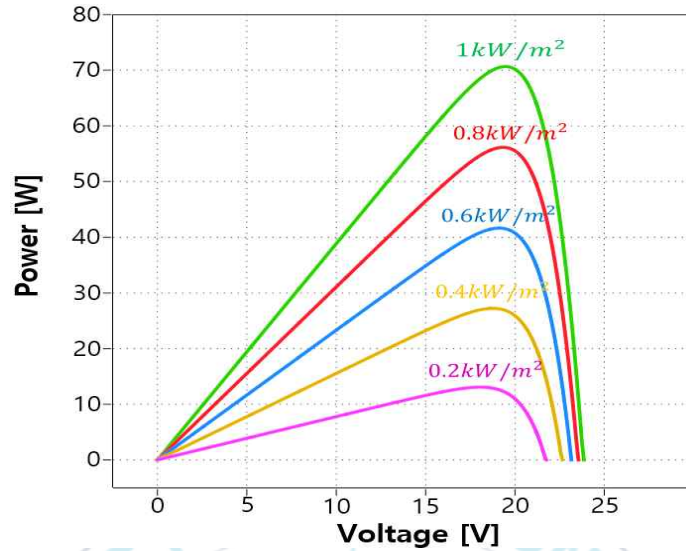


그림 2.3 일사량에 따른 태양광 패널
출력전력-출력전압 특성곡선

태양광 패널의 출력특성으로 인해 최대전력을 출력할 수 있도록 하는 MPPT 제어가 필요하나, MPPT 제어의 지속적인 최대전력 출력으로 인해 계통의 과부하 및 과전압 문제가 발생할 수 있다. 이러한 문제는 태양광 패널의 출력전력을 제한시켜주는 CPG 제어로 해결할 수 있다. 즉, 태양광 패널을 이용한 지속적인 발전을 위해서는 MPPT 제어뿐만 아니라 CPG 제어도 필수적이다.

제 3 장 기존의 스텝-듀티 기법

최근에는 태양광 발전시스템이 계통에 연계되어 전력을 공급할 수 있는 계통 연계형 태양광 발전시스템에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. 계통 연계형 태양광 발전시스템에서 지속적인 최대전력을 생산하게 된다면 계통에 과부하가 걸려 폭발 또는 고장 문제가 발생하게 된다. 이를 방지하기 위해 태양광 패널이 특정한 전력을 출력할 수 있도록 하는 CPG 제어가 필요하다. 대표적으로 사용되고 있는 CPG 제어 방식은 P&O 기법과 비슷하게 태양광 패널의 동작점을 설정된 스텝-듀티값만큼 주기적으로 변화시키며 CPP를 향해 이동시키는 방식을 사용한다. 그림 3.1은 기존의 문헌들에서 사용된 태양광 발전시스템의 제어 순서도를 나타낸다 [14].

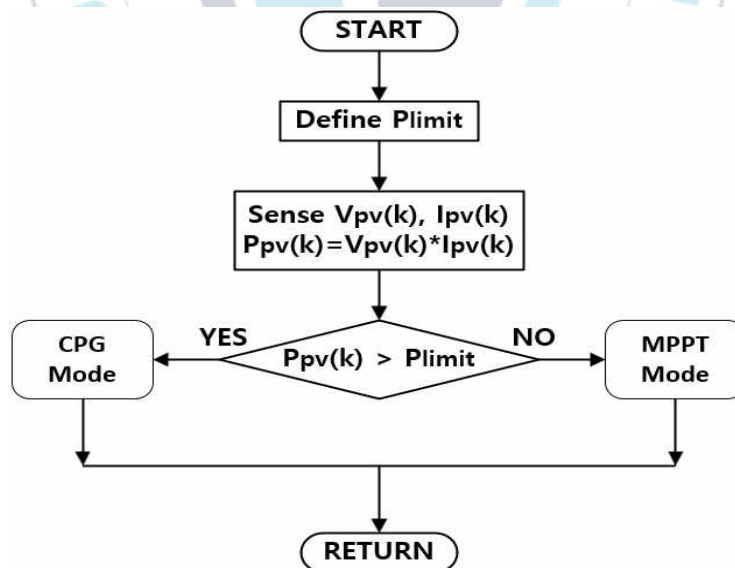


그림 3.1 기존의 문헌들에서 사용된 태양광 발전시스템의 제어 순서도

그림 3.1의 순서도를 이용한 제어기는 계통에서 태양광 패널의 최대전력을 수용할 수 있을 때는 MPPT로 제어가 되며 반대의 경우에는 CPG로 제어가 되어 출력전력을 제한시킨다. 이는 비교적 간단한 제어구조를 가지므로 널리 사용된다. 하지만, 스텝-듀티값만큼 주기적으로 동작점을 이동해야 하는 특성으로 인해 정상상태에 도달하여도 계속해서 동작점이 변경된다. 즉, MPP 또는 CPP에서 전력진동이 일어나며, 이로 인해 태양광 패널의 손실을 일으키게 된다. 낮은 스텝-듀티값을 선정한다면 정상상태에서 작은 전력진동을 가질 수 있지만 과도상태에서 정상상태를 향해 추종하는 속도가 느려진다. 반면, 큰 스텝-듀티값을 선정한다면 과도상태에서 빠른 추종속도를 가질 수 있지만 정상상태에서 큰 전력진동을 가지게 된다. 그러므로 동작 상태에 따른 적절한 스텝-듀티값을 선정하는 것이 태양광 패널을 효율적으로 동작시킬 수 있다.

태양광 패널은 비선형적인 동작 특성을 나타내며 그림 2.3을 통해 MPP를 제외한 나머지 구간에서 동일한 전력을 출력할 수 있는 2가지의 전압값이 존재하는 것을 알 수 있다. 좌측 CPP는 비교적 완만한 기울기를 가지고 있어 전압 변화로 인한 전력 진동이 작으나 추종 시간이 오래 걸리는 특성이 있다. 반면, 우측 CPP는 급격한 기울기로 인해 빠른 추종 시간을 갖게 되지만 전압 변화로 인한 큰 전력 진동을 가질 수 있다. 즉, CPG 제어 시 CPP의 동작 지점까지 고려하여 알맞은 스텝-듀티값을 선정하는 것이 중요하다 [15].

3.1 고정형 스텝-듀티 기법

정상상태 또는 과도상태에 따라 적절한 스텝-듀티값을 선정하는 것이 빠른 추종 속도 및 작은 전력 진동을 가질 수 있다. 즉, 과도상태에선 빠른 추종속도를 가져야하며 정상상태에선 작은 전력진동을 가져야한다. 고정형

스텝-듀티 기법은 과도상태와 정상상태를 구분하여 스텝-듀티값을 선정하는 기법이다. 고정형 스텝-듀티 기법은 식 (3.1)와 같이 나타낼 수 있다.

$$D_{step} = \alpha \times D_{step-st} + (1-\alpha) \times D_{step-tr} \quad (3.1)$$

여기서, α = 상태 판단 계수, $D_{step-st}$ = 정상상태 스텝-듀티, $D_{step-tr}$ = 과도상태 스텝-듀티

식 (3.1)는 상태 판단 계수 α 를 이용하여 정상상태 또는 과도상태를 판단한다. 상태 판단 계수가 1이면 식 (3.1)는 정상상태 스텝-듀티 $D_{step-st}$ 값으로 선정되고 상태 판단 계수가 0이면 식 (3.1)는 과도상태 스텝-듀티 $D_{step-tr}$ 값으로 선정된다. 그림 3.2는 고정형 스텝-듀티 기법에서 상태 판단 계수가 선정되는 순서도를 나타낸다. 여기서, dp^* 는 태양광 패널의 출력전력과 원하는 출력전력값의 차이를 의미하며 dp_{th} 는 전력 차이 허용값을 의미한다.

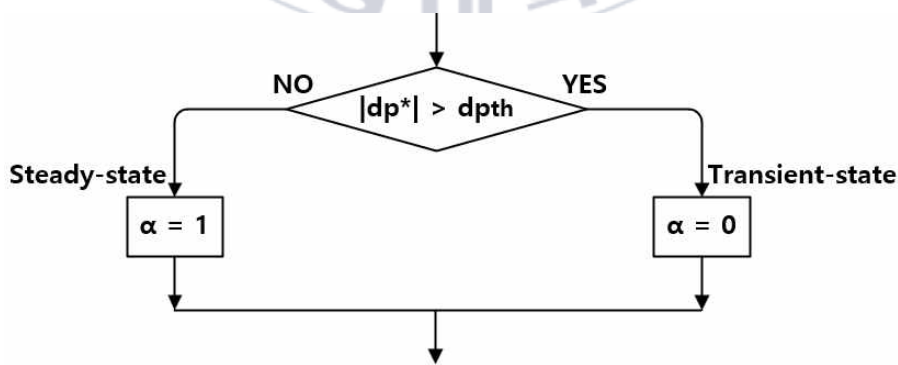
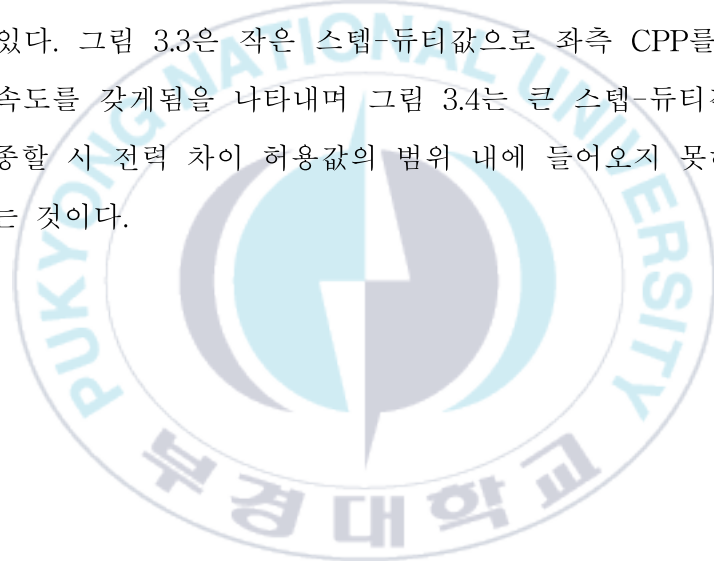


그림 3.2 고정형 스텝-듀티 기법의
상태 판단 계수 선정 순서도

고정형 스텝-듀티 기법은 동작 상태에 따라 2가지 스텝-듀티값을 선정할 수 있지만, 정상상태 스텝-듀티와 과도상태 스텝-듀티가 상수로 고정된 값이므로 외부 환경조건이 변화된다면 동작 성능이 저하된다. 이는 태양광 패널 동작점의 특성에 따라 스텝-듀티가 가변되지 않으므로 최적의 스텝-듀티값을 선정하지 못하기 때문이다. 좌측 CPP는 기울기가 비교적 완만하므로 작은 스텝-듀티값이 선정되면 느린 추종속도를 갖게 된다. 반면, 우측 CPP는 기울기가 비교적 급격하므로 큰 스텝-듀티값이 선정되면 전력 차이 허용값의 범위 밖으로 동작점이 이동되어 과도상태를 유지하게 되는 문제점이 있다. 그림 3.3은 작은 스텝-듀티값으로 좌측 CPP를 추종할 시 느린 추종속도를 갖게됨을 나타내며 그림 3.4는 큰 스텝-듀티값으로 우측 CPP를 추종할 시 전력 차이 허용값의 범위 내에 들어오지 못하는 문제점을 나타내는 것이다.



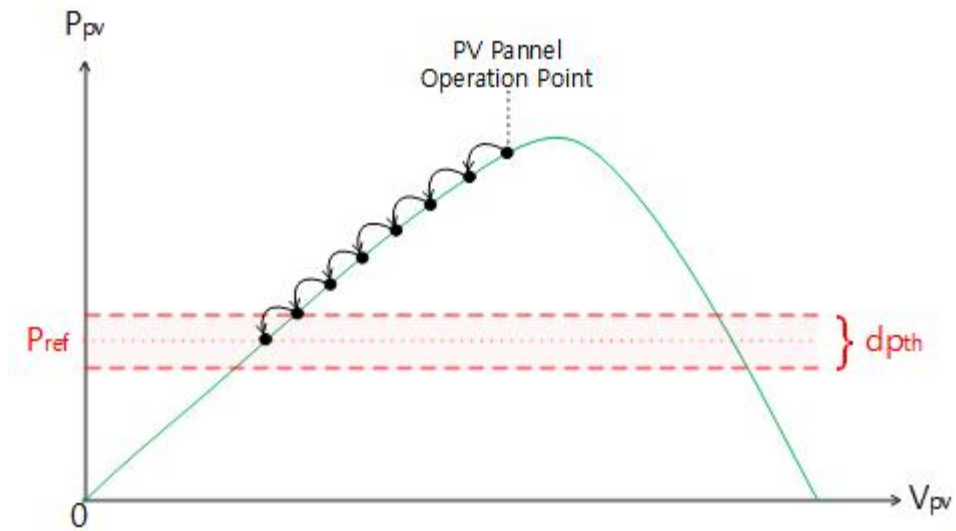


그림 3.3 작은 스텝-듀티값으로 인해 느린 추종속도를 갖게 되는 경우

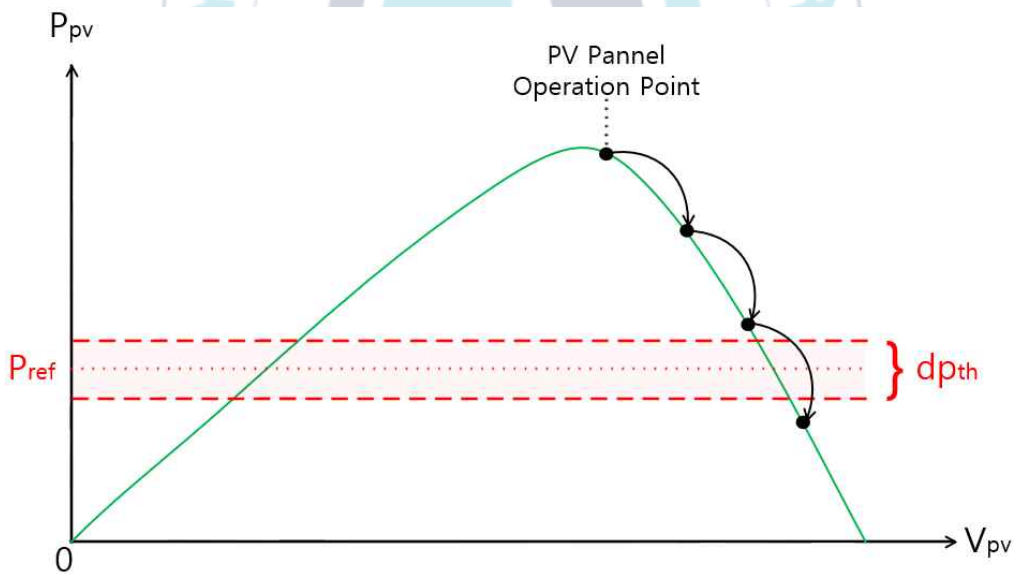


그림 3.4 큰 스텝-듀티값으로 인해 전력 차이 허용값에 속하지 않는 경우

3.2 적응형 스텝-듀티 기법

적응형 스텝-듀티 기법은 고정형 스텝-듀티 기법과 달리 정상상태와 과도상태를 구분할 뿐만 아니라 태양광 패널 동작점의 특성을 확인하여 최적의 스텝-듀티값을 선정할 수 있는 기법이다. 적응형 스텝-듀티 기법은 식 (3.2)와 같이 나타낼 수 있다.

$$D_{step} = \left\{ \alpha \times \left(1 - k_1 \left| \frac{dp}{dv} \right| \right) + (1 - \alpha) \times k_2 \times dp^* \right\} \times D_{step-b} \quad (3.2)$$

여기서, α = 상태 판단 계수, k_1, k_2 = 스텝-듀티 이득 계수, dp = 태양광 패널 출력전력 변화량, dv = 태양광 패널 출력전압 변화량, $dp^* = P_{pv} - P_{ref}$, D_{step-b} = MPPT 제어 시, 최적의 스텝-듀티

식 (3.2)는 상태 판단 계수를 이용하여 정상상태 또는 과도상태를 판단한다. 적응형 스텝-듀티 기법에서 상태 판단 계수를 선정하는 방법은 그림 3.2와 같은 방식을 사용하여 선정한다. 상태 판단 계수가 0일 때, 식 (3.3)과 같이 나타낼 수 있다.

$$D_{step} = k_2 \times dp^* \times D_{step-b} \quad (3.3)$$

식 (3.3)은 과도상태에 대한 스텝-듀티 계산 수식이다. 여기서 과도상태는 출력하고자 하는 전력값과 태양광 패널 출력값의 차이가 허용값보다 클 경우를 의미한다. 즉, dp^* 값이 허용값보다 클 경우를 의미한다. 식 (3.3)을 이용하여 스텝-듀티값을 계산한다면 초기에는 dp^* 값이 크므로 큰 스텝-듀

티값을 가지며 빠른 추종속도를 갖게 된다. 하지만, dp^* 값은 출력하고자하는 전력값에 다가갈수록 줄어들게되며 스텝-듀티값도 줄어들게된다. dp^* 값이 허용값 이내로 들어오게 된다면 과도상태가 끝이 나고 상태 판단 계수가 1로 바뀌게 된다. 상태 판단 계수가 1이 되면, 식 (3.4)와 같이 나타낼 수 있다.

$$D_{step} = (1 - k_1 \frac{|dp|}{|dv|}) \times D_{step-b} \quad (3.4)$$

식 (3.4)는 정상상태에 대한 스텝-듀티 계산 수식이다. 태양광 패널의 동작점이 허용값내에 존재하기 때문에 전력진동의 최소화가 필요하다. 그러므로 작은 크기의 스텝-듀티값을 가지는 것이 전력진동을 최소화할 수 있다.

태양광 패널이 MPPT 제어가 되고 있다면 태양광 패널의 동작점은 P&O 기법의 특성으로 인해 MPP 부근에서 전력진동을 하게 된다. 그림 2.3을 참고하면 MPP 부근의 기울기가 거의 0에 가까운 것을 알 수 있다. 즉, 식 (3.4)는 MPP 부근에서 식 (3.5)와 같이 나타낼 수 있다.

$$D_{step} = D_{step-b} \quad (3.5)$$

D_{step-b} 는 제어 시, 미리 선정된 MPPT에 대한 최적의 스텝-듀티값을 의미한다. 즉, 적응형 스텝-듀티 기법은 MPPT를 위한 최적의 스텝-듀티값을 이용하여 과도상태 및 정상상태 모두 최적의 스텝-듀티값을 계산할 수 있다.

CPP 부근에서는 기울기가 0이 아니므로 정상상태 시, 식 (3.4)의 스텝-

듀티 계산이 수행된다. 여기서, k_1 값은 스텝-듀티 이득 계수로써 미리 선정된 소수값이다. 즉, CPP 부근의 기울기가 가파르더라도 이득 계수의 영향으로 인해 D_{step-b} 값보다 작은 스텝-듀티값이 계산된다. 하지만, CPP는 MPP 기준으로 왼쪽 또는 오른쪽 지점 두군데가 있으며 기울기가 다른 특성을 갖는다. 우측 CPP는 가파른 기울기를 가지고 있어 비교적 큰 $\frac{|dp|}{|dv|}$ 값을 갖는다. 큰 $\frac{|dp|}{|dv|}$ 값은 식 (3.4)를 통해 작은 스텝-듀티값을 얻을 수 있다. 반면, 좌측 CPP는 완만한 기울기를 가지고 있어 작은 $\frac{|dp|}{|dv|}$ 값을 갖게 되어 큰 스텝-듀티값을 얻게 된다. 이는 우측 CPP에서 동작할때는 비교적 작은 전력진동을 갖게 되지만 좌측 CPP에서 동작할때는 큰 전력진동을 갖게 된다. 그러므로 적응형 스텝-듀티 기법은 CPG 제어가 될 때 CPP의 위치에 따라 최적의 스텝-듀티값이 선정되지 않는다. 그림 3.5는 태양광 패널의 동작점에 따른 적응형 스텝-듀티 기법의 원리를 나타낸다. 그림 3.5(b)에서 CPP 위치에 따라 기울기의 차이를 확인할 수 있고 그림 3.5(c)에서 기울기에 따른 스텝-듀티값 선정 결과를 확인할 수 있다. 즉, 적응형 스텝-듀티 기법은 주위 환경변화 및 동작점 특성에 대한 이득 계수값을 변화시켜야 한다는 문제점이 있다.

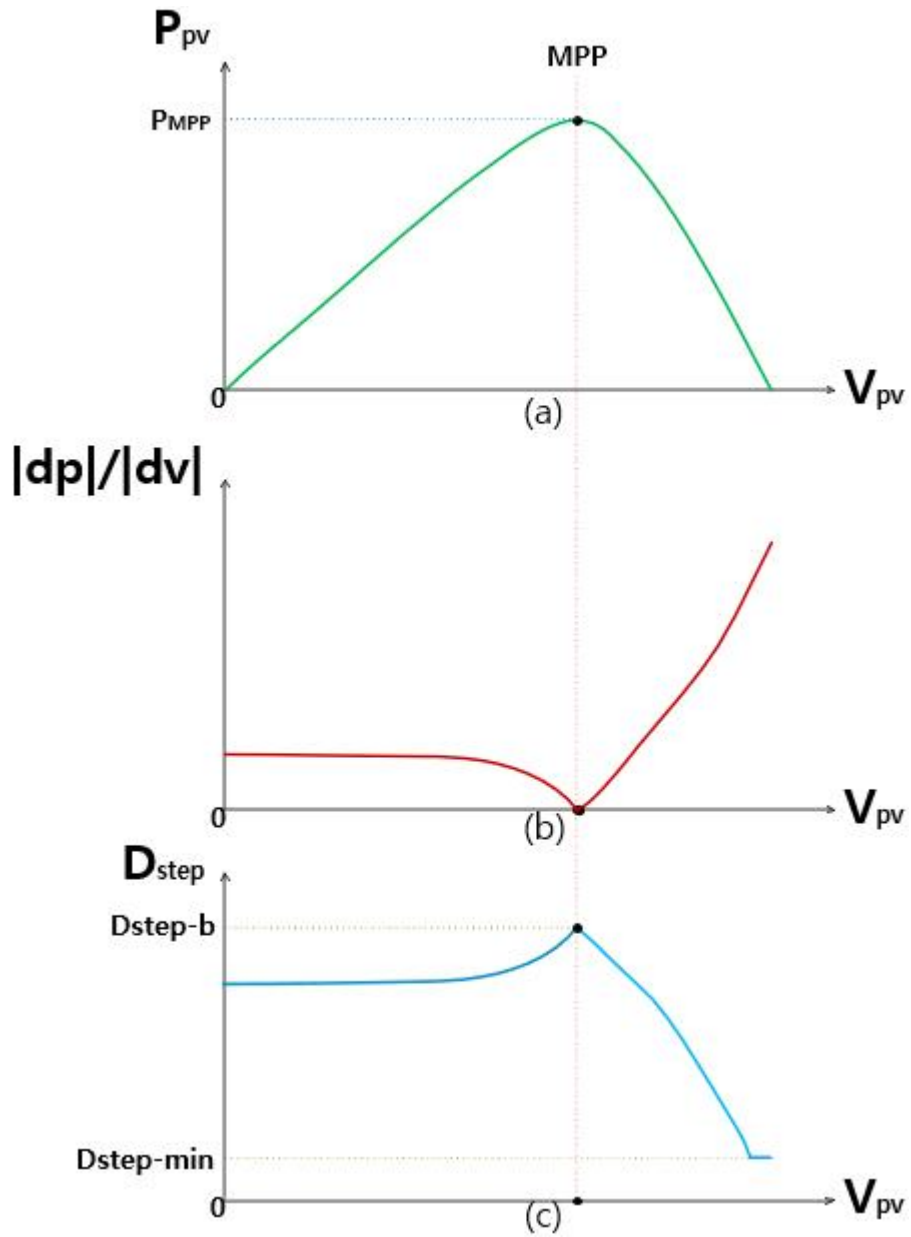


그림 3.5 태양광 패널의 동작점에 따른 적응형 스텝-듀티 기법 원리: (a) 태양광 패널의 P-V 곡선, (b) 동작점에 따른 $|dp|/|dv|$, (c) 식 3.2에 따라 계산된 스텝-듀티값

제 4 장 제안하는 스텝-듀티 기법

4.1 개선된 스텝-듀티 기법

2장에서 확인한 바와 같이 태양광 발전시스템의 고효율 성능을 위해선 최대전력을 출력하는 MPPT 제어의 성능뿐만 아니라 계통의 안전을 위한 CPG 제어의 성능도 중요하다. 여기서, 태양광 발전시스템의 제어 성능은 태양광 패널의 동작점 상태에 따른 최적의 스텝-듀티값을 선정하는 것과 관련되어 있다. 큰 스텝-듀티값을 선정한다면 빠른 추종속도를 갖게 되지만, 정상상태에 도달하여 큰 전력진동을 갖게 된다. 반면, 작은 스텝-듀티값을 선정한다면 정상상태에서 작은 전력진동을 갖게 되지만 느린 추종속도를 갖게 된다.

본 논문에서는 정상상태 또는 과도상태를 판단하여 최적의 스텝-듀티값을 선정할 수 있는 개선된 스텝-듀티 기법을 제안한다. 제안하는 개선된 스텝-듀티 기법은 식 (4.1)과 같다.

$$D_{step} = [\alpha \times \left\{ \beta \times k_1 \times \left| \frac{dp}{dv} \right| + (1-\beta) \times k_2 \times dp^* \right\} + (1-\alpha) \times k_3 \times dp^*] \times D_{step-b} \quad (4.1)$$

여기서, α = 상태 판단 계수, β = 기울기 판단 계수, k_1, k_2, k_3 = 스텝-듀티 이득 계수, $dp^* = P_{pv} - P_{ref}$

식 (4.1)은 상태 판단 계수와 기울기 판단 계수를 이용하여 동작점 상태를 판단하여 최적의 스텝-듀티값을 선정한다. 상태 판단 계수는 정상상태

및 과도상태를 판단하는 계수이며 식 (4.2)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\alpha = \begin{cases} |dp^*| \leq dp_{th} \rightarrow \text{정상상태} (\alpha = 1) \\ |dp^*| > dp_{th} \rightarrow \text{과도상태} (\alpha = 0) \end{cases} \quad (4.2)$$

여기서, dp_{th} = 전력 차이 허용값

전력 차이 허용값은 미리 선정된 값이며, 태양광 패널의 동작점이 전력 허용값보다 큰 범위에 존재한다면 과도상태로 판단되어 빠른 추종속도를 위해 큰 스텝-듀티값이 요구된다.

정상상태 및 과도상태를 전력 차이 허용값만을 이용하여 판단하면 문제점을 갖는다. 이는 전력제한값이 태양광 패널의 MPP로부터 전력 차이 허용값보다 높게 설정되었을 때 발생한다. 그림 4.1은 이러한 경우를 보여주는 태양광 패널의 출력전력-출력전압 그래프이다.

그림 4.1인 경우, 전력제한값이 태양광 패널의 MPP보다 크게 설정되어 있으므로 MPPT 제어가 진행되며 동작점은 정상상태에 속해있다. 하지만, 전력제한값이 MPP로부터 전력 차이 허용값보다 높게 설정되어 있으므로 이러한 상황에서 식 (4.2)는 과도상태라는 판단을 하게 된다. 이를 방지하기 위해 식 (4.2)에 추가적인 조건이 필요하며 그림 4.2는 정상상태 및 과도상태를 판단하는 최종적인 알고리즘 순서도를 나타낸다.

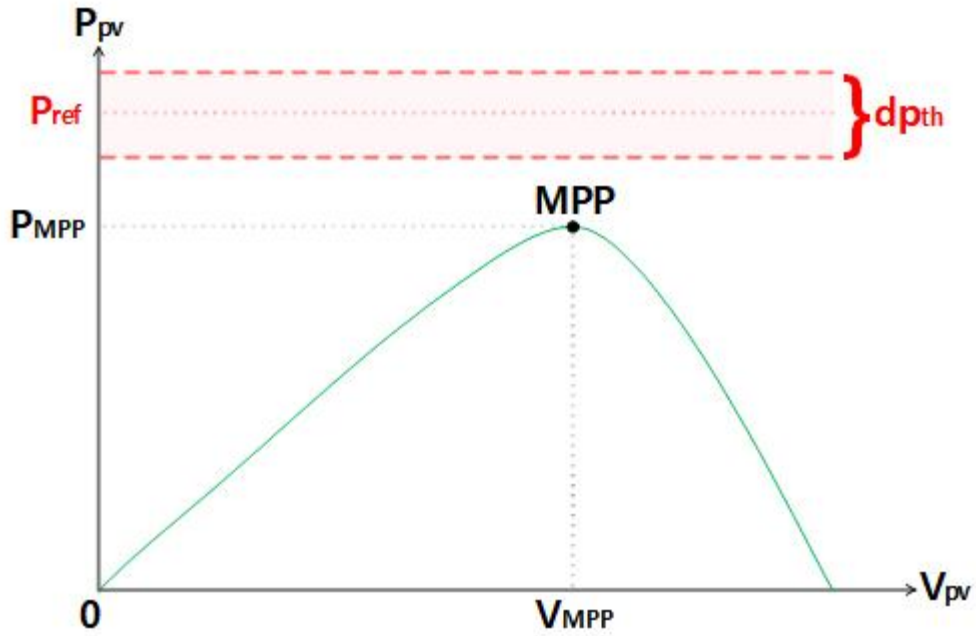


그림 4.1 MPPT 제어의 정상상태인 경우

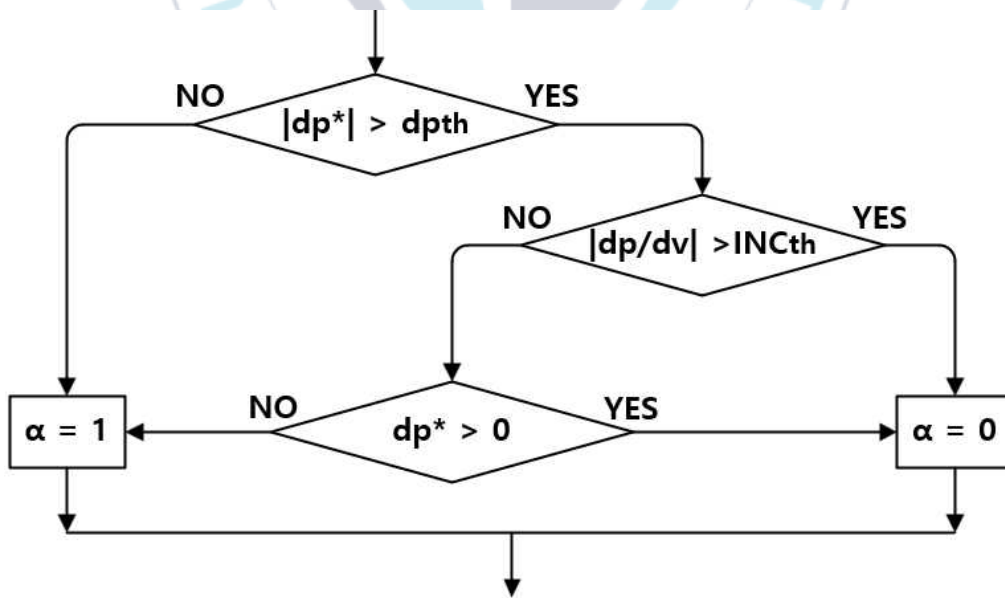


그림 4.2 정상상태 및 과도상태 판별 알고리즘 순서도

그림 4.2에서 INC_{th} 는 기울기 허용값을 의미한다. MPP 부근의 기울기는 다른 지점의 기울기보다 낮은 값을 갖게 된다. 이를 이용하여 전력 차이 허용값보다 큰 범위에 있는 경우에도 기울기 허용값 이내에 존재한다면 상태 판단 과정을 추가적으로 진행하게 된다. 이때, 태양광 패널의 출력전력 값이 전력제한값보다 크다면 과도상태로 판단하며 반대의 경우에 정상상태로 판단된다.

식 (4.3)은 개선된 스텝-듀티 기법의 과도상태인 경우에 대한 수식을 나타낸다.

$$D_{step} = k_3 \times dp^* \times D_{step-b} \quad (4.3)$$

과도상태의 경우 빠른 추종속도를 위해 비교적 큰 스텝-듀티값을 가져야 한다. 식 (4.3)에 존재하는 dp^* 로 인해 태양광 패널의 동작점이 전력제한값과 차이가 클 때는 큰 스텝-듀티값이 선정되며 전력제한값에 다가갈수록 dp^* 값의 크기가 줄어들어 스텝-듀티값이 줄어들게 된다. 크기가 줄어들지 않는다면 태양광 패널의 동작점이 전력 차이 허용값의 범위밖으로 이동될 수 있어 정상상태로 바뀌지 않을 수 있다.

식 (4.4)는 개선된 스텝-듀티 기법의 정상상태인 경우에 대한 수식을 나타낸다.

$$D_{step} = \left\{ \beta \times k_1 \times \left| \frac{dp}{dv} \right| + (1 - \beta) \times k_2 \times dp^* \right\} \times D_{step-b} \quad (4.4)$$

식 (4.4)에서 기울기 판단 계수는 MPPT 제어와 CPG 제어를 판단하는 계수이며 식 (4.5)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\beta = \begin{cases} \left| \frac{dp}{dv} \right| \leq INC_{th} \rightarrow MPPT(\beta = 1) \\ \left| \frac{dp}{dv} \right| > INC_{th} \rightarrow CPG(\beta = 0) \end{cases} \quad (4.5)$$

태양광 패널 동작점의 기울기를 판단하여 기울기 허용값이내의 기울기값을 가진다면 MPP 지점 부근이므로 기울기 판단 계수는 1로 판단된다. 반면, 기울기 허용값보다 큰 기울기값을 가진다면 CPP 부근이므로 기울기 판단 계수는 0으로 판단된다. 식 (4.6)과 식 (4.7)은 기울기 판단 계수가 1 또는 0으로 판단되었을 때 나타낸 수식이며, 그림 4.3은 기울기 판단 계수를 판단하는 알고리즘 순서도를 나타낸다.

$$D_{step} = k_1 \times \left| \frac{dp}{dv} \right| \times D_{step-b} \rightarrow MPPT(\beta = 1) \quad (4.6)$$

$$D_{step} = k_2 \times dp^* \times D_{step-b} \rightarrow CPG(\beta = 0) \quad (4.7)$$

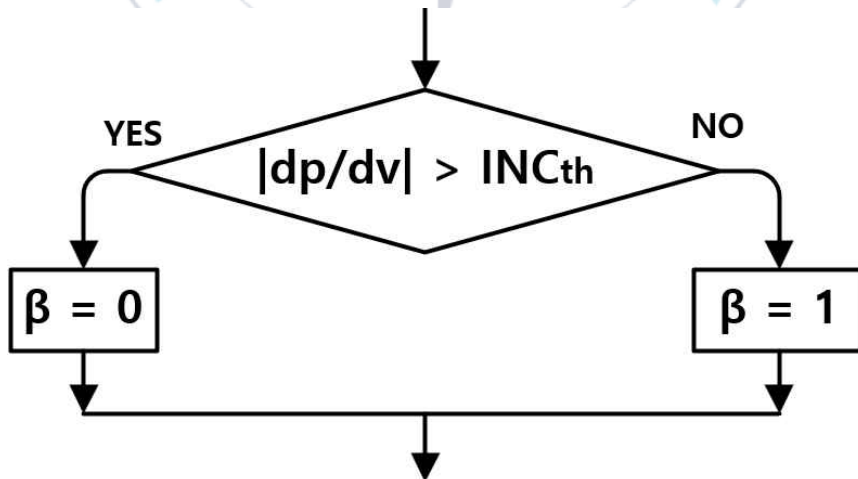


그림 4.3 기울기 판단 계수 β 를 판단하는 알고리즘 순서도

식 (4.6)은 정상상태일 경우에 해당하는 MPPT 제어의 스텝-듀티 선정 수식이다. MPP 부근은 기울기가 0에 가까운 작은 값을 가지므로 이를 이용하여 스텝-듀티값을 선정한다면 정상상태에서의 전력진동을 최소화시킬 수 있다.

식 (4.7)은 정상상태일 경우에 해당하는 CPG 제어의 스텝-듀티 선정 수식이다. CPP 부근은 기울기가 크므로 식 (4.6)을 이용하게 되면 큰 스텝-듀티값을 갖게 되어 큰 전력진동을 갖게 된다. 그러므로 기울기를 대신해 dp^* 값을 이용하여 정상상태 CPG 제어의 전력진동을 최소화시켜준다. 좌측 CPP 및 우측 CPP 모두 동일한 dp^* 값을 가지므로 모든 CPP에서 전력진동을 최소화시킬 수 있다.

4.2 제어기 구성

본 논문에서 제안한 개선된 스텝-듀티 기법을 적용한 태양광 발전시스템의 전체적인 제어 알고리즘은 그림 4.4와 같이 구성되어 있다. 여기서 상태 판단 계수는 그림 4.2의 알고리즘을 이용하였고 기울기 판단 계수는 그림 4.3의 알고리즘을 이용하여 선정한다. MPPT 제어는 그림 4.5의 P&O 기법 순서도를 이용하였고 CPG 제어는 그림 4.6의 CPG 기법 순서도를 이용하였다.

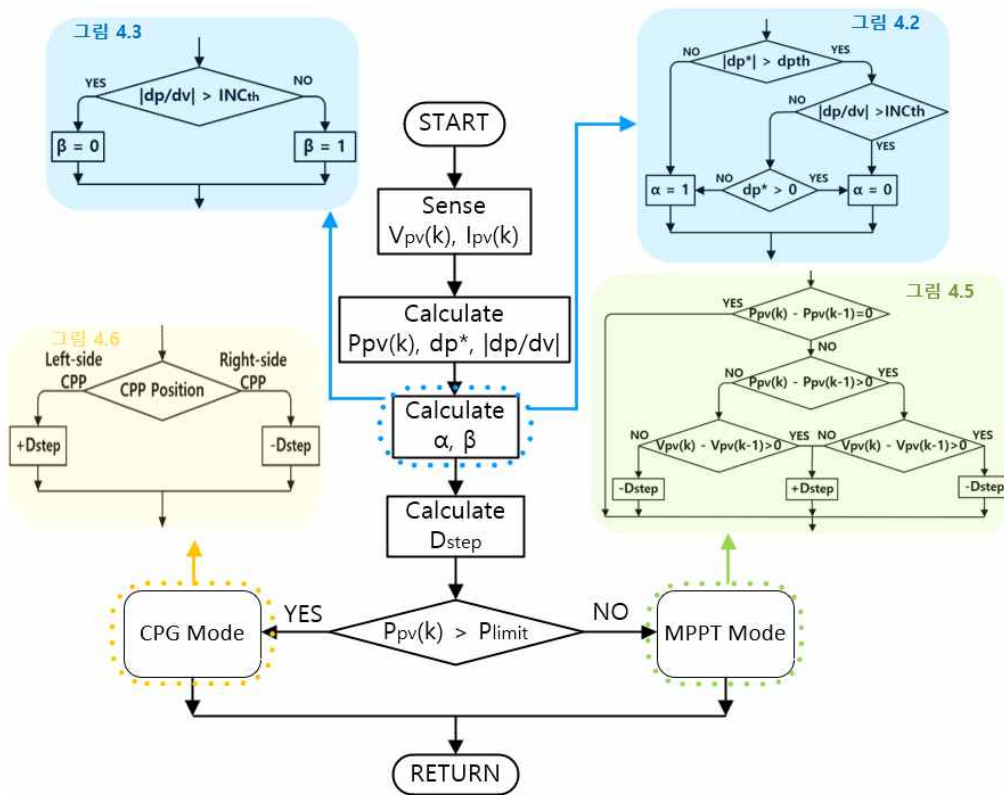


그림 4.4 제안한 개선된 스텝-듀티 기법을 적용한 태양광 발전시스템의 전체적인 제어 알고리즘 순서도

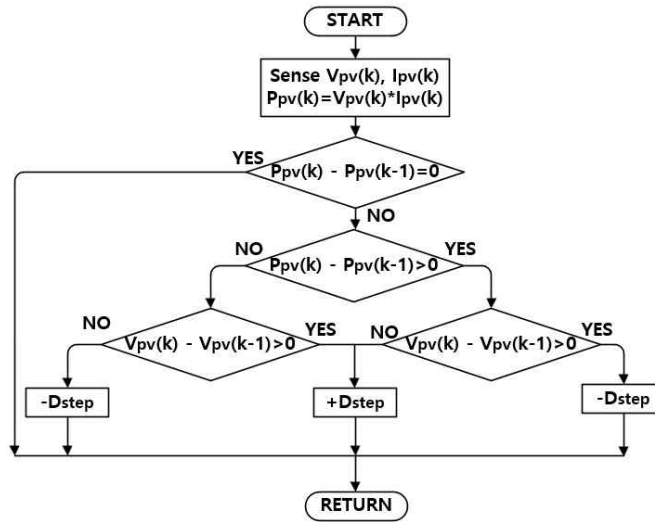


그림 4.5 P&O 기법을 이용한 MPPT 제어 알고리즘 순서도

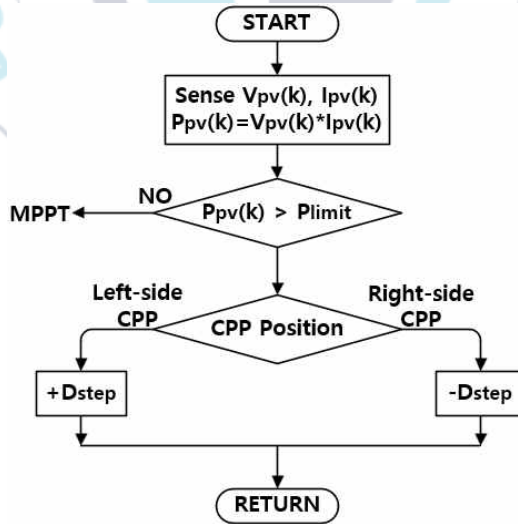


그림 4.6 CPP 위치 선정이 가능한 CPG 제어 알고리즘 순서도

그림 4.6의 CPG 제어 알고리즘은 CPP Position의 상태에 따라 좌측 또는 우측으로 CPP를 선정할 수 있다. 여기서 CPP Position은 외부 제어기로부터 상태를 받아들이는 값으로 식 (4.8)과 같이 나타낼 수 있다.

$$CPP_{position} = \begin{cases} 0 \rightarrow CPP_{Right-side} \\ 1 \rightarrow CPP_{Left-side} \end{cases} \quad (4.8)$$

4.3 스텝-듀티 이득 계수의 영향

제안된 개선된 스텝-듀티 기법은 식 (4.1)을 참고하면 3개의 스텝-듀티 이득 계수를 가지고 있다. 적응형 스텝-듀티 기법도 이득 계수를 가지고 있으며, 스텝-듀티 이득 계수가 크게 선정된다면 빠른 추종 속도를 가질 수 있지만 정상 상태 시 상대적으로 큰 전력 진동을 가지게 된다. 반면 스텝-듀티 이득 계수가 작게 선정된다면 작은 전력 진동을 가질 수 있지만 느린 추종 속도를 가지게 된다. 본 논문에서 제안한 기법은 상태 판단 계수와 기울기 판단 계수를 이용하여 이득 계수가 크게 선정되어도 정상 상태 시 전력 진동을 최소화 시킬 수 있다. 하지만, 작은 이득 계수의 특성은 여전히 존재하므로 제안된 기법은 동작점 상태에 알맞은 최적의 스텝-듀티 이득 계수가 선정된다면 우수한 효율을 기대할 수 있다. 그림 4.7은 제안한 기법에서 3개의 이득 계수를 0.005 또는 0.0005로 동일하게 선정했을 때, 태양광 패널의 동작에 끼치는 영향을 나타낸다. 그림 4.7을 통해 제안한 기법은 정상 상태 시 전력 진동에는 큰 차이가 없지만 작은 이득 계수의 특성인 느린 추종 속도가 있음을 확인할 수 있다.

제 5 장 시뮬레이션 및 실험

제 4 장에서 제안한 개선된 스텝-듀티 기법은 이전의 기법들과 달리 정상상태 또는 과도상태를 판단하고 좌측 또는 우측 CPP를 구분하여 최적의 스텝-듀티값을 선정할 수 있는 기법이다. 이는 과도상태시에 빠른 추종속도를 얻을 수 있고, 정상상태시에는 MPPT 제어뿐만 아니라 CPG 제어에도 작은 전력진동을 갖게한다. 또한, CPG 제어 시 좌측 및 우측 CPP 모두를 고려하여 작은 전력진동을 갖게할 수 있다.

제안한 개선된 스텝-듀티 기법을 적용한 태양광 패널이 원하는 출력전력점으로 빠르게 추종이 되는지, 정상상태에서 이전의 기법들보다 작은 전력진동을 가질 수 있는지에 대한 검증은 시뮬레이션과 실험을 통해 검증하였다.

5.1 시뮬레이션 검증

제안한 개선된 스텝-듀티 기법을 적용한 태양광 발전시스템의 제어를 시뮬레이션을 통해 제어기 알고리즘을 개발하고 검증하였다. 이때, 태양광 발전시스템의 제어를 하기 위한 DC-DC 컨버터는 부스트 컨버터를 사용하였다. 제안한 기법의 검증을 위한 시뮬레이션은 PLECS 소프트웨어를 사용하였으며 태양광 패널 또한 PLECS 소프트웨어를 이용하여 모델링하였다.

5.1.1 태양광 발전시스템의 제어 구조

태양광 발전시스템의 제어는 그림 5.1과 같이 구성되어 있다. 태양광 패널이 부스트 컨버터의 입력단에 연결되어 있으며 부스트 컨버터는 태양광 패널의 출력전압 및 출력전류를 입력받아 MPPT 및 CPG 제어를 수행한다. 이때, 본 논문에서 제안한 개선된 스텝-듀티 기법과 이전의 참고문헌에서 제안한 고정형 스텝-듀티 기법과 적응형 스텝-듀티 기법을 사용하여 기법들의 성능을 비교 및 분석한다. 시뮬레이션은 일사량, 전력제한값 및 CPP 위치를 조절하여 시뮬레이션을 수행하였다. 그림 5.2는 시뮬레이션에서 사용된 회로도이고 표 5.1은 시뮬레이션에 사용한 태양광 패널의 파라미터이며 표 5.2는 부스트 컨버터의 파라미터이다.

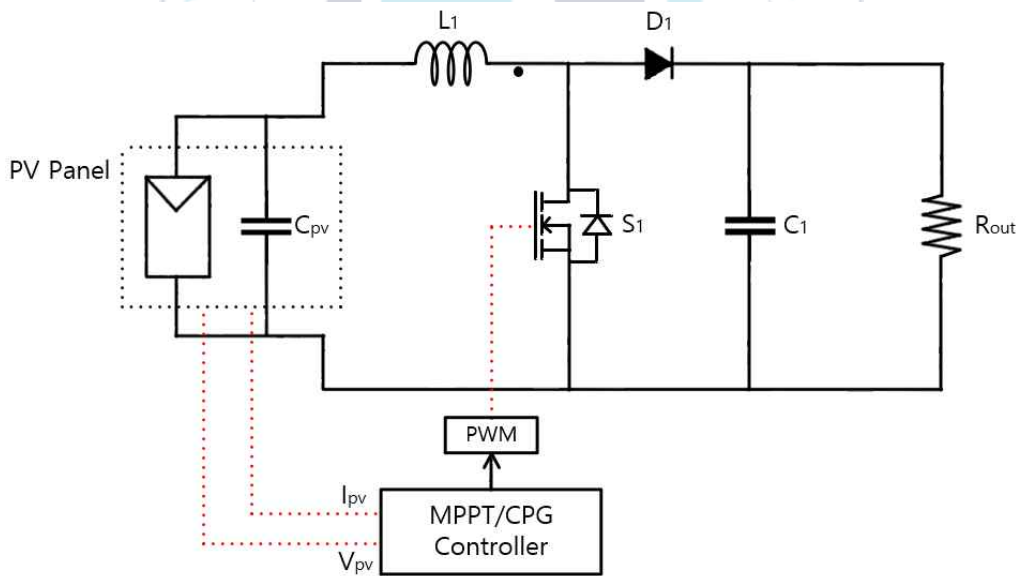


그림 5.1 태양광 발전시스템의 제어 구조

표 5.1 태양광 패널 파라미터

Parameter	Description	Value
V_{oc}	Open-circuit Voltage	75 [V]
I_{sc}	Short-circuit Current	18 [A]
V_{mpp}	MPP Voltage	60 [V]
I_{mpp}	MPP Current	16.67 [A]
SOL	Irradiation	1000 [W/m^2]
$TEMP$	Temperature	25 [$^{\circ}C$]

표 5.2 부스트 컨버터 파라미터

Parameter	Description	Value
V_{i-typ}	Typical Input Voltage	60 [V]
V_{o-typ}	Typical Output Voltage	120 [V]
P	Power	1 [kW]
L_1	Filter Inductor	181 [μH]
C_1	Filter Capacitor	73.8 [μF]
f_{sw}	Switching Frequency	100 [kHz]

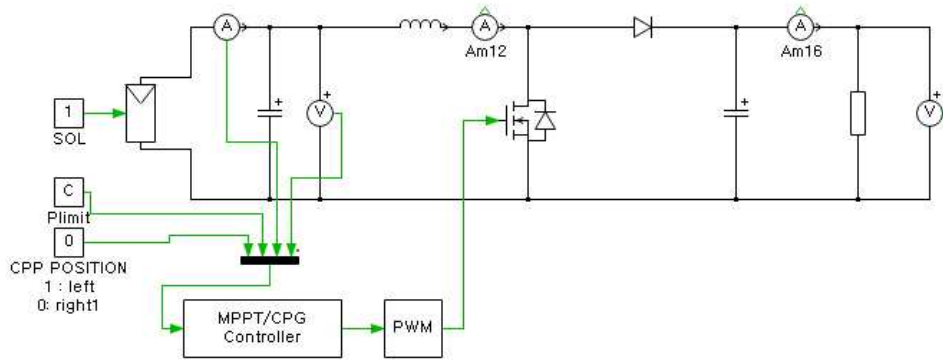


그림 5.2 태양광 발전시스템의 제어 시뮬레이션 회로도

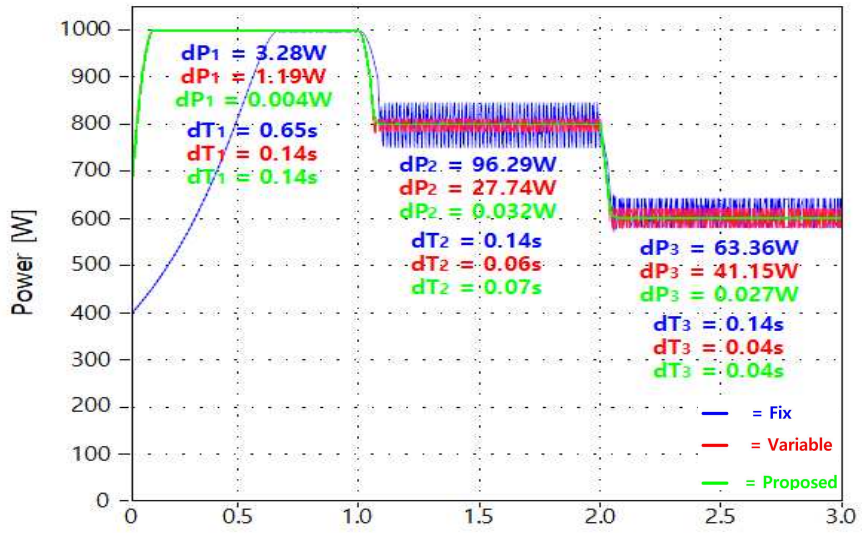
5.1.2 좌측 CPP에 대한 전력제한값 변화 시뮬레이션 결과

첫 번째 시뮬레이션은 일정한 일사량에서 전력제한값을 변화시키며 좌측 CPP에 대한 태양광 패널의 동작점을 분석한다. 표 5.3은 좌측 CPP에 대한 전력제한값 변화 시뮬레이션의 조건에 대한 표를 나타낸다.

표 5.3 좌측 CPP에 대한 전력제한값 변화 시뮬레이션 조건표

Parameter	Value		
	0 ~ 1s	1 ~ 2s	2 ~ 3s
$SOL [W/m^2]$	1000	1000	1000
P_{limit}	1200	800	600
k_{1-sta}	0.005		
k_{2-sta}	0.005		
k_{3-sta}	0.001		
k_{1-pri}	0.005		
k_{2-pri}	0.001		

PV Panel POWER



PV Panel Voltage

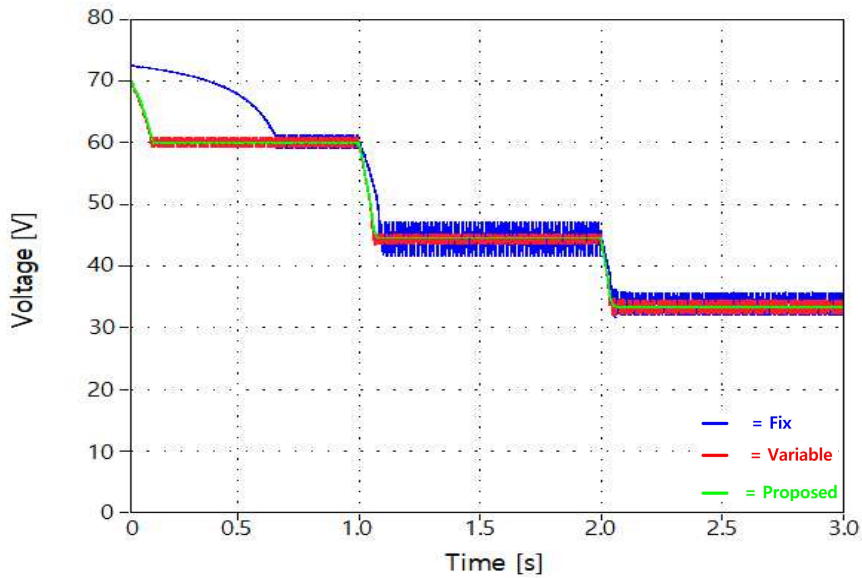


그림 5.3 좌측 CPP에 대한 전력제한값 변화 시뮬레이션 결과

그림 5.3은 좌측 CPP에 대한 전력제한값 변화 시뮬레이션의 결과를 나타낸다. 여기서, dP 는 전력진동 크기를 나타내며 dT 는 정상상태를 향한 추종 시간을 나타낸다. 동일한 조건을 위해 세 가지 기법들은 동일한 크기의 스텝-듀티 이득 계수를 선정하였다. 시뮬레이션은 dP_1 ($0 \sim 1s$)구간동안 MPPT 제어가 수행되고 dP_2 ($1 \sim 2s$)구간동안 800W로 전력제한이 걸려 CPG 제어가 수행되며 dP_3 ($2 \sim 3s$)구간동안 600W로 전력제한값이 바뀌며 CPG 제어가 수행된다. 시뮬레이션 결과, dP_1 구간에서 고정형 스텝-듀티 기법은 3.28W, 적응형 스텝-듀티 기법은 1.19W, 제안된 기법은 0.004W의 전력진동 크기를 가진다. dP_2 구간에서 고정형 스텝-듀티 기법은 96.29W, 적응형 스텝-듀티 선정 기법은 27.74W, 제안된 기법은 0.032W의 전력진동 크기를 가진다. dP_3 구간에서 고정형 스텝-듀티 기법은 63.36W, 적응형 스텝-듀티 기법은 41.15W, 제안된 기법은 0.027W의 전력진동 크기를 가진다. 이를 통해 제안된 기법은 가장 작은 전력진동 크기를 가지는 기법임을 확인할 수 있다.

고정형 스텝-듀티 기법은 고정된 스텝-듀티값으로 인해 다른 기법들보다 0.51초 늦게 정상상태에 도달하는 것을 알 수 있다. 적응형 스텝-듀티 기법과 제안한 기법은 비슷한 추종시간을 갖는 것을 확인할 수 있으며 그림 5.5와 비교 시 더 빠른 추종시간을 갖는 것을 알 수 있다. 이는 식 (3.2)와 식 (4.1)에서 완만한 기울기를 갖는 좌측 CPP의 느린 추종속도 특성을 방지하기 위해 원하는 출력점과 현재 출력점의 차이로 과도상태 시 큰 스텝-듀티크기를 선정하여 빠른 추종속도를 갖기 때문이다.

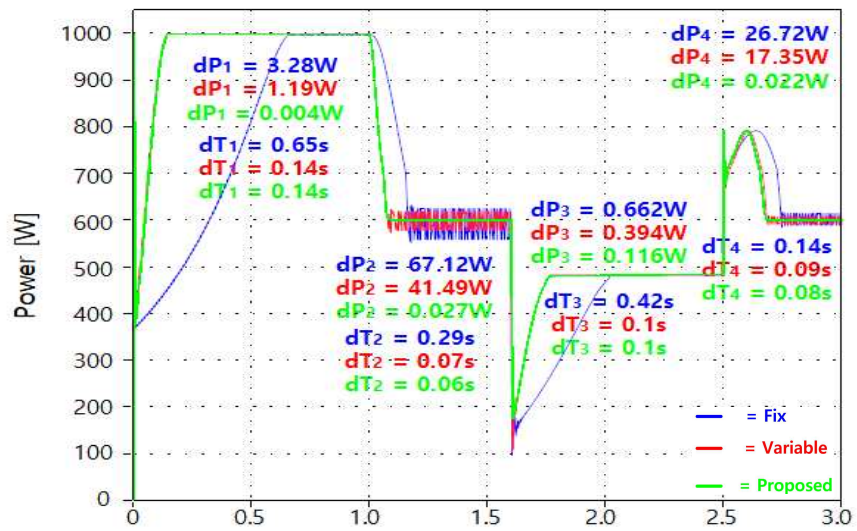
5.1.3 좌측 CPP에 대한 일사량 변화 시뮬레이션 결과

두 번째 시뮬레이션은 전력제한값 600W에서 일사량을 변화시키며 좌측 CPP에 대한 태양광 패널의 동작점을 분석한다. 표 5.4는 좌측 CPP에 대한 일사량 변화 시뮬레이션의 조건에 대한 표를 나타낸다.

표 5.4 좌측 CPP에 대한 일사량 변화 시뮬레이션 조건표

Parameter	Value			
	0 ~ 1s	1 ~ 1.5s	1.5 ~ 2.5s	2.5 ~ 3s
$SOL [W/m^2]$	1000	1000	500	800
P_{limit}	1200	600		
k_{1-sta}	0.005			
k_{2-sta}	0.005			
k_{3-sta}	0.001			
k_{1-pri}	0.005			
k_{2-pri}	0.001			

PV Pannel POWER



PV Pannel Voltage

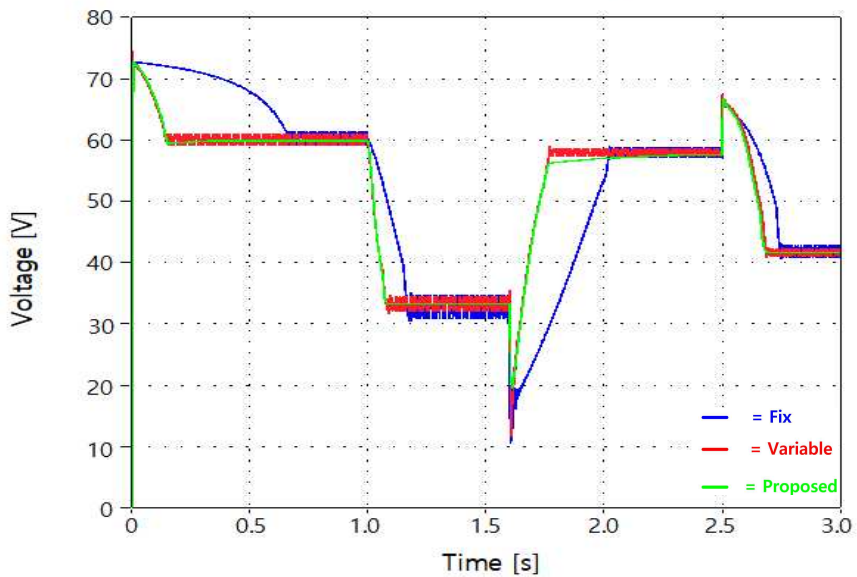


그림 5.4 좌측 CPP에 대한 일사량 변화 시뮬레이션 결과

그림 5.4는 좌측 CPP에 대한 일사량 변화 시뮬레이션의 결과를 나타낸다. 여기서, dP_1 (0 ~ 1s)과 dP_3 (1.6 ~ 2.5s)구간은 태양광 패널의 최대출력전력보다 높은 전력제한값을 갖는 구간이므로 MPPT 제어가 되며 dP_2 (1 ~ 1.6s) 와 dP_4 (2.5 ~ 3s)구간은 최대출력전력보다 전력제한값이 더 낮은 구간이므로 CPG 제어가 된다. 시뮬레이션 결과, dP_1 구간에서 고정형 스텝-듀티 기법은 3.28W, 적응형 스텝-듀티 기법은 1.19W, 제안된 기법은 0.004W의 전력진동 크기를 가진다. dP_2 구간에서 고정형 스텝-듀티 기법은 67.12W, 적응형 스텝-듀티 기법은 41.49W, 제안된 기법은 0.027W의 전력진동 크기를 가진다. dP_3 구간에서 고정형 스텝-듀티 기법은 0.662W, 적응형 스텝-듀티 기법은 0.394W, 제안된 기법은 0.116W를 가진다. dP_4 구간에서 고정형 스텝-듀티 기법은 26.72W, 적응형 스텝-듀티 기법은 17.35W, 제안된 기법은 0.022W를 가진다. 이를 통해 제안된 기법은 일사량이 변화하는 조건에서도 다른 기법들보다 항상 작은 전력진동 크기를 갖는 기법임을 확인할 수 있다.

일사량 변화 시뮬레이션에서도 고정형 스텝-듀티 기법은 정상상태를 향한 추종 시간이 오래 걸리게 되는 것을 알 수 있다. 좌측 CPP에 대한 일사량 변화 시뮬레이션을 통해 제안한 기법은 가장 우수한 추종시간을 갖는 것을 확인할 수 있고, 정상상태에서 가장 적은 전력진동 크기를 갖는 것을 알 수 있다.

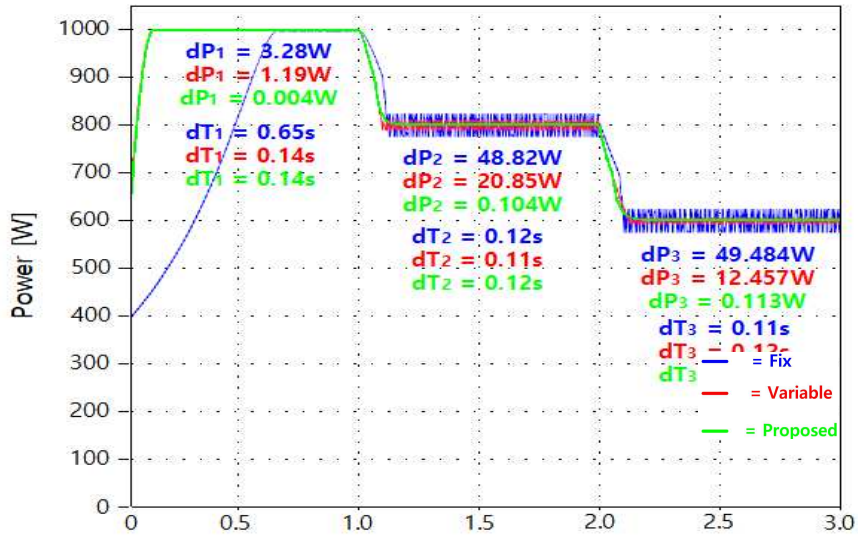
5.1.4 우측 CPP에 대한 전력제한값 변화 시뮬레이션 결과

세 번째 시뮬레이션은 일정한 일사량에서 전력제한값을 변화시키며 우측 CPP에 대한 태양광 패널의 동작점을 분석한다. 우측 CPP에 대한 전력제한값 변화 시뮬레이션의 조건은 좌측 CPP에 대한 전력제한값 변화 시뮬레이션의 조건인 표 5.3과 동일한 조건을 사용하고 dP_2 구간은 800W의 전력제한값을 갖는 우측 CPP이며 dP_3 구간은 600W의 전력제한값을 갖는 우측 CPP이다. 그림 5.5는 우측 CPP에 대한 전력제한값 변화 시뮬레이션의 결과를 나타낸다. dP_1 구간은 좌측 CPP에 대한 전력제한값 변화와 동일한 조건이므로 동일한 전력진동 크기를 가지는 것을 확인할 수 있다. dP_2 구간에서 고정형 스텝-듀티 기법은 48.82W, 적응형 스텝-듀티 기법은 20.85W, 제안된 기법은 0.104W의 전력진동 크기를 갖는다. dP_3 구간에서 고정형 스텝-듀티 기법은 49.484W, 적응형 스텝-듀티 기법은 12.457W, 제안된 기법은 0.113W의 전력진동 크기를 갖는다.

그림 5.5의 시뮬레이션 결과와 그림 5.3의 시뮬레이션 결과를 비교해보면 우측 CPP에서 동작할 때 더 적은 전력 진동을 갖는 것을 확인할 수 있다. 이는 좌측 CPP는 비교적 낮은 기율기를 가지나 태양광 패널의 출력 전압이 단락 전압에 가까워져 부스트 컨버터의 듀티 사이클이 1에 가까워지게 된다. 그러므로, 부스트 컨버터의 입출력 전압에 대한 제어가 불안정해지고 큰 진동이 발생하게 되어 좌측 CPP가 더 큰 전력진동을 갖게 된다.

제안한 기법은 좌측 또는 우측 CPP에서 모두 작은 전력 진동을 가질 수 있으므로 CPP 지점에 상관없이 우수한 효율을 가지는 것을 확인할 수 있다.

PV Pannel POWER



PV Pannel Voltage

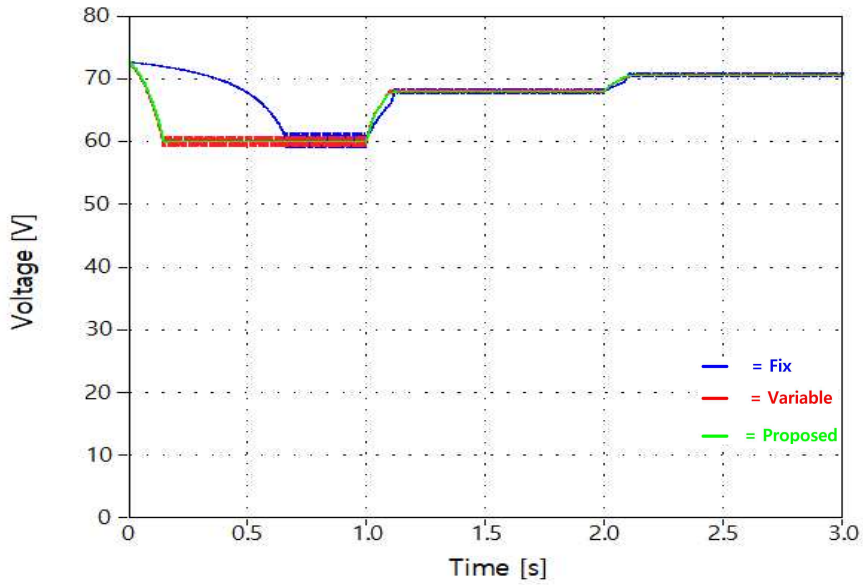


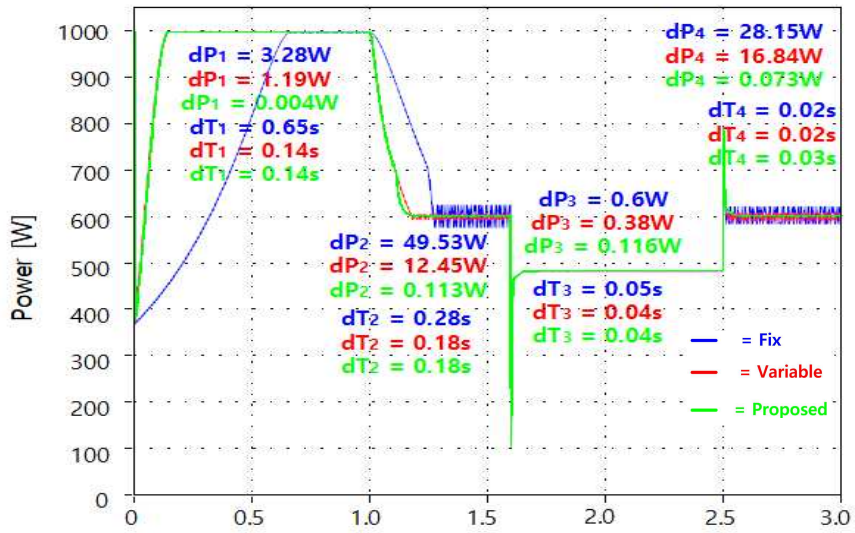
그림 5.5 우측 CPP에 대한 전력제한값 변화 시뮬레이션 결과

5.1.5 우측 CPP에 대한 일사량 변화 시뮬레이션 결과

네 번째 시뮬레이션은 전력제한값 600W에서 일사량을 변화시키며 우측 CPP에 대한 태양광 패널의 동작점을 분석한다. 우측 CPP에 대한 일사량 변화 시뮬레이션의 조건은 좌측 CPP에 대한 일사량 변화 시뮬레이션의 조건인 표 5.4와 동일한 조건을 사용하고 dP_1 과 dP_3 구간은 MPPT 제어가 수행되며 dP_2 과 dP_4 구간은 우측 CPP를 향한 CPG 제어가 수행된다. 그림 5.6은 우측 CPP에 대한 일사량 변화 시뮬레이션에 대한 결과를 나타낸다. 그림 5.4와 비교해보면 dP_3 와 dP_4 구간에서 우측 CPP는 좌측 CPP보다 비교적 작은 듀티 변화로 큰 전력 변화를 이끌어 낼 수 있으므로 고정형 스텝-듀티 기법의 추종 시간이 감소된 것을 확인할 수 있다. 적응형 스텝-듀티 기법과 제안된 기법은 과도상태 시 계산되는 스텝-듀티값이 비슷하므로 비슷한 추종속도를 갖는 것을 확인할 수 있다.

dP_1 구간은 같은 조건이므로 동일한 전력진동 크기를 가지며 dP_2 구간에서 고정형 스텝-듀티 기법은 49.53W, 적응형 스텝-듀티 기법은 12.45W, 제안된 기법은 0.113W의 전력진동 크기를 가진다. dP_3 구간에서 고정형 스텝-듀티 기법은 0.6W, 적응형 스텝-듀티 기법은 0.38W, 제안된 기법은 0.116W의 전력진동 크기를 갖는다. dP_4 구간에서 고정형 스텝-듀티 기법은 28.15W, 적응형 스텝-듀티 기법은 16.84W, 제안된 기법은 0.073W의 전력진동 크기를 갖는다.

PV Panel POWER



PV Panel Voltage

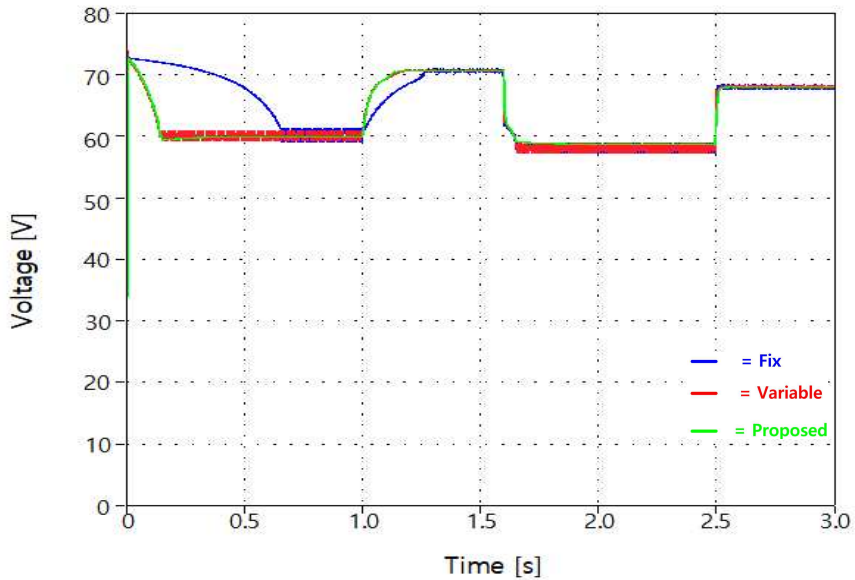


그림 5.6 우측 CPP에 대한 일사량 변화 시뮬레이션 결과

우측 또는 좌측 CPP에 대해 전력제한값을 변화 시키는 조건과 일사량을 변화시키는 조건 모두에서 제안된 기법은 이전 기법들에 비해 가장 작은 전력진동을 갖는 다는 것을 확인할 수 있다. 작은 전력진동은 부스트 컨버터의 효율을 향상시킬 수 있으며 태양광 발전시스템의 우수한 동작 성능을 기대할 수 있다. 또한, 제안한 기법은 급격한 일사량의 변화 및 전력제한값의 변화에도 과도상태를 인지하여 큰 스텝-듀티값을 이용해 정상상태를 향해 가장 우수한 추종 속도를 갖는다는 것을 확인할 수 있다.



제 6 장 결 론

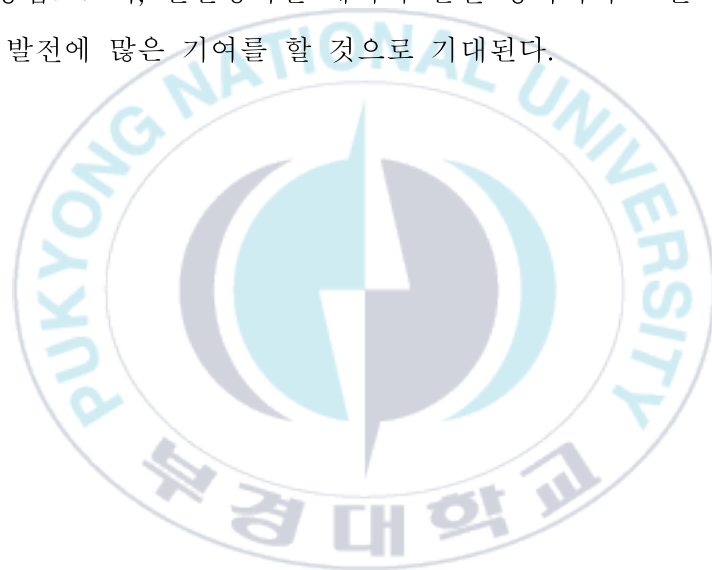
본 논문에서는 태양광 발전시스템의 성능을 향상시킬 수 있는 개선된 스텝-듀티 기법을 제안하였다. 태양광 패널은 고유한 비선형 특성을 가지므로 MPPT를 추종하기 위한 MPPT 제어가 필요하나, 지속적인 MPPT 제어가 수행된다면 계통의 과부하 및 과전압 문제가 발생할 수 있다. 이러한 문제는 태양광 패널의 출력전력을 제한시켜주는 CPG 제어로 해결할 수 있다. 즉, 효율적인 태양광 발전시스템의 동작을 위해선 CPG 제어가 필수적이다.

대표적인 CPG 제어는 전력 루프 기법, 고정형 스텝-듀티 기법, 적응형 스텝-듀티 기법들이 문헌에서 제안되어 왔다. 전력 루프 기법은 비교적 간단한 구조를 가지지만 CPG 제어 시, 우측 CPP만 추종가능하다는 단점이 있다. 고정형 스텝-듀티 기법과 적응형 스텝-듀티 기법은 좌측 또는 우측 CPP를 모두 추종할 수 있으며 상태 판단 계수를 이용해 과도상태 및 정상상태를 구분하여 스텝-듀티값을 선정할 수 있다. 하지만, 태양광 패널의 동작점 상태가 변화되면 최적의 스텝-듀티값을 선정하지 못 한다는 단점이 있다. 태양광 발전시스템의 고효율 동작을 위해선 태양광 패널의 동작점 상태에 따라 알맞은 스텝-듀티값을 선정할 수 있는 제어가 필요하다.

본 논문에서는 스텝-듀티값에 따라 속응성과 안정성이 상호 양립하는 단점을 보완하기 위한 개선된 스텝-듀티 기법을 제안한다. 제안한 제어기법을 검증하기 위해 PLECS 시뮬레이션을 이용하여 태양광 패널 및 부스트 컨버터를 모델링하여 제어기법을 적용하였다. 이때, 이전에 제안된 고정형 스텝-듀티 기법과 적응형 스텝-듀티 기법들도 적용하여 각 기법에 따른 태양광 패널의 동작점 상태를 비교 및 분석하였다.

제안하는 개선된 스텝-듀티 기법은 이전의 기법들보다 우수한 추종속도를 가지며 모든 구간에서 전력진동을 감소시킬 수 있음을 확인하였다. 이는 정상상태에서는 작은 스텝-듀티값을 선정하여 전력 진동을 최소화시킬 수 있고 과도상태에서는 비교적 큰 스텝-듀티값을 선정하여 빠른 추종속도를 얻을 수 있는 제어 기법임을 검증한 결과이다.

제안한 개선된 제어기법은 CPG 제어가 필요한 태양광 발전시스템에서 기존에 존재하던 속응성과 안정성이 상호 양립하는 문제점을 해결하는 새로운 제어방법으로써, 친환경적인 에너지 발전 방식이며 고갈의 우려가 없는 태양광 발전에 많은 기여를 할 것으로 기대된다.



참 고 문 헌

- [1] 유미지, “EI, 재생에너지 발전량 늘었지만 화석연료 지배력 여전...전체 에너지 소비량 82% 차지”, 2023. 06. 27.
- [2] 한지은, “신재생에너지 기술 발전 전망”, 에너지경제연구원, 2015.
- [3] 권선형, “IEA, 2027년 재생에너지 글로벌 전력원 90% 이상 차지...2025년 초 석탄 제치고 세계 최대 전력 공급원으로 성장”, 2022. 12. 27.
- [4] 강정화, “2023년 상반기 태양광산업 동향”, 한국수출입은행, 2023. 07. 25.
- [5] 최용구, “글로벌 태양광 설치량 최대 360GW 전망 ‘프로젝트 개발’ 시장 속제”, 인터스트리뉴스, 2023. 08. 08.
- [6] Y. Yang, H. Wang, F. Blaabjerg and T. Kerekes, “A Hybrid Power Control Concept for PV Inverters with Reduced Thermal Loading”, IEEE Trans. Power Electron, vol. 29, no. 12, pp. 6271-6275, Dec. 2014.
- [7] Q. Weijie, Z. Zhongfeng, L. Jiapeng, W. Jianhua and H. Binhui, “Research on Power Limiting Strategy of PV Power Generation Based on MPPT and Power Loop”, 2022 Asian Conference on Frontiers of Power and Energy(ACFPE), Chengdu, China, pp. 661-665, 2022.
- [8] N. Femia, G. Petrone, G. Spagnuolo, M. Vitelli, “Optimization of Perturb and Observe Maximum Power Point Tracking Method”, IEEE Trans. Power Electron., vol. 20, no. 4, pp. 963-973, Jul. 2005.

- [9] R. K. Kharb, S. L. Shimi, S. Chatterji and M. D. F. Ansari, "Modeling of Solar PV Module and Maximum Power Point Tracking Using ANFIS", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 33, pp. 602-612, 2014.
- [10] E. Prasetyono, D. O. Anggriawan, A. Z. Firmansyah and N. A. Windarko, "A Modified MPPT Algorithm Using Incremental Conductance for Constant Power Generation of Photovoltaic Systems," 2017 International Electronics Symposium on Engineering Technology and Applications (IES-ETA), Surabaya, Indonesia, pp. 1-6, 2017.
- [11] H. D. Tafti, A. Sangwongwanich, Y. Yang, J. Pou, G. Konstantinou and F. Blaabjerg, "An Adaptive Control Scheme for Flexible Power Point Tracking in Photovoltaic Systems," in *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 34, no. 6, pp. 5451-5463, June, 2019.
- [12] H. D. Tafti, A. I. Maswood, G. Konstantinou, J. Pou and F. Blaabjerg, "A General Constant Power Generation Algorithm for Photovoltaic System," in *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 33, no. 5, pp. 4088-4101, May, 2018.
- [13] 김준동, "시대를 앞서가는 신기술 태양전지 연구 고효율 실현하는 차세대 태양전지 기술력", *SOLAR TODAY*, 2012. 05. 17.
- [14] R. I. Yuwanda, E. Prasetyono and R. P. Eviningsih, "Constant Power Generation Using Modified MPPT P&O to Overcome Overvoltage on Solar Power Plants," 2020 International Seminar on Intelligent Technology and Its Applications (ISITIA), Surabaya, Indonesia, pp. 392-392, 2020.

- [15] A. Sangwongwanich, Y. Yang, F. Blaabjerg and H. Wang, “Benchmarking of Constant Power Generation Strategies for Single-Phase Grid-Connected Photovoltaic Systems”, in IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 54, no. 1, pp. 447-457, Jan-Feb, 2018.



감사의 글

지난 2년간의 소중한 석사 생활의 결실을 맺으며, 지도 교수님과 선배, 후배, 동기들의 따뜻한 지지와 격려에 감사의 말씀을 전하고자 합니다.

저를 지도해 주신 고영종 교수님께 깊은 감사의 말씀을 전합니다. 석사 생활을 하면서 얻은 지도와 지지는 말로 표현하기 어려운 소중한 경험이었습니다. 교수님의 훌륭한 지도를 통해 저는 학문과 연구에 대한 새로운 시야를 얻을 수 있었습니다. 또한, 석사 생활 과정에서 어려움을 극복하고 마무리할 수 있게 되었습니다. 이러한 경험은 저의 학문적 성장뿐만 아니라 인간적 성숙에도 큰 기여를 한 것 같습니다. 석사 생활을 통해 배운 것을 미래에 선하게 활용할 수 있도록 노력하겠습니다.

수업을 통해 많은 가르침을 주신 김인동 교수님께 깊은 감사의 말씀을 전합니다. 교수님의 수업과 가르침 덕에 전기기기 제어를 이해하는 데 있어 많은 도움이 되었습니다. 또한, 질문에 정성스럽게 답변해 주셔서 감사드립니다.

실제 시스템의 적용에 대해 가르침을 주신 노의철 교수님께 깊은 감사의 말씀을 전합니다. 교수님의 수업을 통해 이론뿐만 아니라 실제 시스템의 설계 고려 사항에 대해서 깊이 생각할 수 있게 되었고, 교수님의 예리한 질문을 통해 저를 성장시킬 수 있었습니다.

옆에 있으면 항상 든든했던 김준태 선배님, 첫 대학교 M.T 때 제가 속한 조의 조장으로 만나게 된 인연이 어느덧 6년이 넘었습니다. 힘들 때는 먼저 다가와 행복을 주시고, 모를 때는 먼저 다가와 조언을 주셔서 감사합니다. 선배님과 함께한 추억들 소중히 간직하며 계속해서 만들어 가겠습니다. 한숨을 함께 쉬어주던 박성현 선배님, 다른 연구실에 속하지만 같은 연구

실의 후배처럼 저를 챙겨주셔서 감사합니다. 미숙한 저의 질문에 정성스러운 답변을 해주시고, 함께 실험까지 진행해 주셨던 선배님 덕분에 많은 것을 해결할 수 있었습니다. 또한, 선배님의 연구뿐만 아닌 인생의 조언들을 통해 방황할 수도 있었던 저의 석사 생활을 바로잡게 되었습니다. 감사합니다.

갈팡질팡하는 저를 이끌어 주신 곽보승 선배님, 모르는 것을 가르쳐 줄 때 정확한 근거로 답변을 해주신 배치환 선배님에게도 많은 것을 배울 수 있었습니다. 감사합니다. 새로 들어온 김현서 후배, 석사 생활을 통해 좋은 결실을 맺길 바랍니다.

학부 시절부터 함께한 김주원 군, 저의 고민을 자신의 고민처럼 함께 생각해 주며 서로의 석사 생활을 응원할 수 있는 저의 동기가 되어주어 감사합니다.

유일하게 같은 연구실 생활을 함께한 김민솔 군, 저의 대학 생활의 모든 순간을 함께 했다고 해도 과언이 아닐 정도입니다. 연구실 생활에 지쳐 날이 서있을 때 박카스를 통해 기운을 주고, 방황하는 모습에 커피 한 잔과 고민을 들어주고, 토닥여주며 잡아주었기에 석사 생활을 마무리할 수 있었습니다. 감사합니다.

항상 고마운 존재인 정현웅 군, 대학 생활 동안 저의 행복을 담당해 주었습니다. 저의 생각 또는 마음과 잘 맞았기에, 저의 많은 고민들을 들어주며 진심어린 답변을 통해 많이 성숙해질 수 있었습니다. 감사합니다.

마지막으로 이 특별한 순간을 맞이할 수 있도록 해주신 부모님에게, 항상 저를 믿어주시고 응원해 주심에 깊은 감사의 말씀을 전합니다. 마음 표현이 미숙하여 표현해 드리지 못하였지만 부모님의 무한한 사랑을 느끼게 해주어 감사합니다. 이 논문의 완성은 부모님의 끊임없는 지지와 격려 덕분에 가능했습니다. 이 모든 것을 감사하게 생각하며, 부모님에게 이 작은 성

과를 바칩니다. 항상 감사하며 사랑합니다.

2024년 2월

엄부현

