

태양광 발전 최적화를 위한 모듈단위 전력변환장치의 비선형 제어기법에 대한 연구

안정호¹, 다이리아리양¹, 박성준², 진창성^{3*}
¹한양대학교 전기공학과, ²(주)더블유피, ³원광대학교 전기공학과

A Study on Nonlinear Control Techniques of Module Level Power Electronics for Optimization of Photovoltaic Power Generation

Jung-Ho Ahn¹, Jialiang Dai¹, Seong-Jun Park², Chang-Sung Jin^{3*}

¹Division of Electrical Engineering, Hanyang University,
²WP Co.

³Division of Electrical Engineering, Wonkwang University

요약 태양광 에너지는 화석연료를 대체할 수 있는 지속가능한 발전 자원으로써 발전효율과 계통연계 안정성에 대한 많은 연구들이 진행되고 있다. 하지만 외부에 설치되어야 하는 태양광 발전소 특성상 날씨 또는 구름 등에 의해 음영지역이 발생하여 태양광 패널의 출력이 급변하게 된다. 안정적인 출력을 위해 승강압이 모두 가능한 Buck-Boost 토폴로지가 널리 사용되고 있지만 기존의 선형 제어기법으로는 제어 시스템의 불확실성이 존재할 때 강인한 출력 성능을 보장하지 못하는 한계를 가지고 있다. 이를 개선하기 위해 본 논문에서는 스위칭 상태의 유연성을 가지고 고효율 출력을 달성할 수 있는 모듈단위 전력변환 컨버터를 설계하고 비선형 제어기법을 이용하여 시스템의 과도상태 속응성과 정상상태 안정성을 개선하였다. PV 패널의 비선형적인 I-V 특성에 대해 논문에서 제안하는 토폴로지와 제어기법을 사용한다면 과도상태 속응성을 5.6배 이상 빠르게 향상시켜 태양광 발전의 최대전력점 추적속도를 높일 수 있다. 제안된 제어기법의 우수성을 검증하기 위하여 PSIM을 통한 모의실험을 수행하였고 기존 선형 제어기와 제안하는 비선형 제어기 출력파형의 비교분석을 통해 타당성을 검증한다.

Abstract Photovoltaic (PV) energy is being researched extensively as a sustainable power source alternative to fossil fuels, focusing on improving the power generation efficiency and grid stability. On the other hand, shading caused by weather or clouds can result in rapid fluctuations in PV panel output due to the inherent nature of PV plants being installed outdoors. The Buck-Boost topology, which can perform step-up and step-down conversion, is used widely to achieve stable output. Conventional linear control methods face limitations in ensuring robust output performance under system uncertainties. This study designed a Module-level Power Electronics converter that achieved high-efficiency output with the flexibility of switching states and improved the transient response and steady-state stability of the system using nonlinear control techniques. The transient response speed can be improved by more than 5.6 times by applying the proposed topology and control method to the nonlinear I-V characteristics of PV panels, enhancing the maximum power point tracking speed in solar power generation. The superiority of the proposed control method was verified by conducting the simulations using PSIM, and the validity was confirmed through comparative analysis of the output waveforms between the conventional linear controller and the proposed nonlinear controller.

Keywords : Photovoltaic, Cascade Buck-Boost Converter, Nonlinear Control Method, SMC, GaN FET

본 논문은 중소벤처기업부와 중소기업기술정보진흥원의 “지역특화산업육성(R&D, S3365142)” 사업의 지원을 받아 수행된 연구결과임.

*Corresponding Author : Chang-Sung Jin(Wonkwang Univ.)

email: csjin@wku.ac.kr

Received May 24, 2024

Accepted July 5, 2024

Revised June 18, 2024

Published July 31, 2024

1. 서론

세계적으로 급증하는 에너지 수요와 비례하여 환경 오염에 대한 우려와 화석 연료 고갈에 대한 문제는 재생가능 에너지의 통합을 촉진하는 촉매 역할을 하고 있다. 결과적으로 각 국가의 정부와 대학 연구소 및 산업계는 종래의 소모성 자원의 족쇄에서 벗어날 수 있는 다양한 재생가능 에너지 자원을 발견하고 연구하고 있다 [1,2]. 이러한 재생가능 에너지 자원 중 태양광 에너지 발전 시스템은 상대적으로 작은 발전소 면적으로 충분한 전력을 생산할 수 있는 형태로서 정부뿐만 아니라 개인 사업자 레벨에서도 진입 장벽이 낮아 각광 받는 발전 시스템이다.

하지만 태양광 발전 시스템은 외부 환경에 노출되어 설치되기 때문에 대기 오염의 부산물 또는 구름 및 날씨 변화에 대한 음영지역 발생 등으로 태양광 전지로부터 생산 가능한 전력에 큰 변화를 가지게 된다 [3]. 일반적으로 다양한 직·병렬 조합에 따른 태양광 패널 배열은 하나의 스트링에 묶여 DC-AC 인버터입력으로 전력이 전달되고 인버터를 통해 최대 전력점 추종(MPPT)을 진행하게 된다. 이때 태양광 패널에 음영지역이 발생하게 되면 패널 전체에 영향을 주게 되어 인버터에서 MPPT를 진행하게 되어도 시스템의 전체 전력이 낮은 상태로 MPPT를 진행하는 문제가 발생하게 된다. 이러한 문제를 해결하기 위해 본 논문에서는 각 태양광 패널에 MPPT 발전이 가능한 모듈 단위 DC-DC 전력변환 컨버터 토폴로지를 사용하여 부분 음영지역이 발생하더라도 시스템의 전체 효율을 높일 수 있는 태양광 발전 시스템을 제안한다.

일반적으로 벽-부스트 컨버터 토폴로지를 사용해 모듈단위 전력변환 장치를 설계한다면 양방향 전력변환에 대해 유연한 대처가 가능하지만 출력 전압의 극성이 전환된다는 특성을 가지게 된다. 이로 인해 입력전압과 출력 전압 사이의 접지 기준이 달라져 추가적인 회로 설계 및 비용 증대 등 다양한 문제가 발생하는 단점이 있다 [4,5].

이러한 문제는 스위칭 소자를 추가하여 해결할 수 있지만 소자 개수가 증가할수록 스위칭 손실이 증가하는 문제가 발생하게 된다. 이는 Si FET에 비해 상대적으로 낮은 도통 저항과 역 회복 전류가 없는 GaN FET 소자 특성을 사용해 스위칭 손실을 줄여 시스템의 고효율화가 가능하다. 또한 스위칭 주파수와 반비례하는 인덕턴스와 커패시턴스 특성을 이용해 하드웨어 크기를 줄일 수 있

는 장점을 가진다 [6-9].

더불어 4개의 스위칭 소자를 사용한 양방향 벽-부스트 컨버터는 일반적인 단일 컨버터보다 입출력 변동이 높은 특성을 가지기 때문에 입출력 파라미터와 인덕터 및 커패시터 파라미터 등 다양한 변수들에 대해 비선형적인 동적 특성을 가지게 된다 [10]. 따라서 기존의 선형 제어기(e.g., PI)로는 파라미터의 급격한 변화에 대해 제어 지령을 추종하는 속응성과 안정성에 대해 한계를 가지게 된다 [11].

위에서 언급된 종합적인 문제점을 개선하기 위해 본 논문에서는 비선형 제어 기법을 적용하여 양방향 벽-부스트 컨버터에 대한 과도응답 속응성을 개선하고 고속 스위칭에 대한 안정성을 높여 불확실한 외란에 대해 효율적으로 대응할 수 있는 전력변환 시스템을 제안한다.

본문에서는 개선된 시스템 검증에 사용된 직결형 벽-부스트 컨버터 동작 원리와 비선형 제어기 설계 방안에 대해 서술한다. 시뮬레이션으로는 PSIM 프로그램을 사용하여 제안한 토폴로지와 구동 알고리즘을 구현하고 그 결과로는 기존 PI 제어기와 비선형 제어기의 과도상태 속응성 및 안정성에 대한 비교분석을 진행하여 제안한 시스템의 타당성을 검증한다.

2. 본론

태양광 발전 시스템은 재생가능 에너지 자원 중 상대적으로 설치가 용이하다는 장점이 있지만 Fig. 1과 같이 발전된 전력을 계통에 연계하는 경우 시스템의 효율을 높게 유지해야 하는 문제가 있다. 따라서 본 논문에서 제안하는 시스템은 Fig. 2와 같이 모듈단위 전력변환 장치(MLPE) 구조를 사용하였다. MLPE는 패널 각각의 출력을 측정할 수 있으며 측정된 전력은 실시간 모니터링을 통해 서버로 전달되고 운영하고자 하는 지침에 따라 패널 출력을 조절하여 발전효율을 최적화시킬 수 있다.

전력변환 시스템에 사용되는 토폴로지 중 Fig. 3과 같이 구성되는 일반적인 벽-부스트 컨버터는 구현이 간단하고 양방향 전력변환이 가능하여 흔히 사용되지만, 입출력 극성이 반대가 되는 문제가 있다. 이로 인해 앞서 언급한 다양한 문제들이 발생하지만, 본 논문에서는 4개의 스위칭 반도체를 사용하여 MPPT 추적 속도를 높이는 제어법에 대해 제안한다.

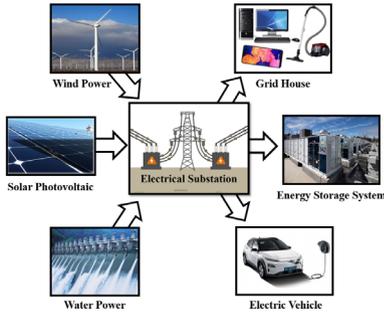


Fig. 1. Structure of renewable energy system(RES)

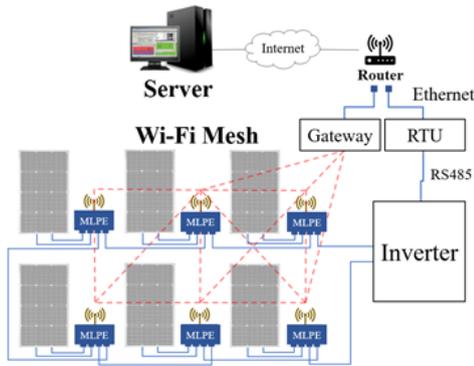


Fig. 2. Wireless communication system for module level DC-DC converter

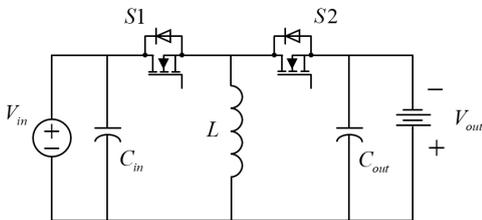


Fig. 3. Inverting bidirectional buck-boost converter

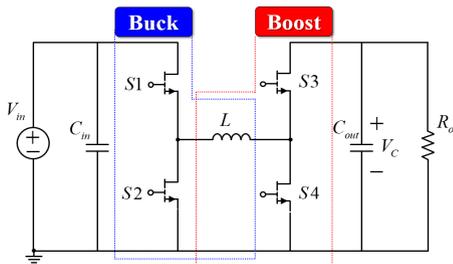


Fig. 4. Non-isolated cascaded buck-boost converter

2.1 직결형 벡-부스트 컨버터의 동작 원리

직결형 벡-부스트 컨버터는 Fig. 4와 같이 4개의 스위칭 소자로 구성되며 메인 인덕터를 기준으로 좌측의 상단 S1 스위치와 하단 S2 스위치는 벡 모드를 담당하고, 우측의 상단 S3 스위치와 하단 S4 스위치는 부스트 모드를 담당한다.

Fig. 5는 스위칭 상태에 따른 등가회로를 나타낸다. Fig. 5(a)는 S1, S3 스위치가 ON 되고 S2, S4 스위치는 OFF 된 상태를 나타내며 입력 전압으로부터 부하 측에 에너지를 직접적으로 전달한다. Fig. 5(b)는 S1, S4 스위치가 ON 되고 S2, S3 스위치가 OFF 된 상태로, 인덕터가 입력 전압으로부터 충전되는 상태를 나타낸다. Fig. 5(c)는 S2, S3 스위치가 ON 되고 S1, S4 스위치가 OFF 된 상태이며 State 2에서 충전된 인덕터의 에너지가 부하 측으로 전달되어 방전되는 상태를 나타낸다. 위 State 1~3 동작 중에서 컨버터가 State 1과 State 2를 반복한다면 S1과 S3 스위치가 상보적으로 동작하여 벡 모드가 구동되고, State 1과 State 2를 반복한다면 S1은 항상 ON 된 상태에서 S3, S4 스위치가 상보적으로 동작하여 부스트 모드가 구동된다.

State 2와 State 3의 반복 동작은 벡-부스트 동작을 나타내며 듀티 비에 의해 컨버터의 출력 전압이 결정된다 [12]. Fig. 5(d)는 S2, S4 스위치가 ON 되어 인덕터 전류가 접지측으로 연결되어 컨버터 내부에서 순환하는 상태를 나타낸다. PCB에 제작되어 고정된 인덕턴스 값에 대해서 인덕터에 저장된 에너지의 방전과 충전 상태를 적절히 전환하여 연속 전도 모드(CCM)와 불연속 전도 모드(DCM) 영역을 선택할 수 있다.

2.2 직결형 벡-부스트 컨버터의 수학적 모델링

S3 스위치는 ON 되고, S4 스위치는 OFF 된 상태를 가정할 때 직결형 벡-부스트 컨버터의 인덕터 전압과 출력전류는 다음과 같이 나타낸다.

$$L \frac{di_L}{dt} = V_{in}u_1 - i_L - V_C \quad (1)$$

$$C \frac{dV_C}{dt} = i_L - \frac{V_C}{R_o} \quad (2)$$

여기서 L 과 C 는 각각 메인 인덕턴스와 출력 커패시터를 나타내고, i_L 은 인덕터 전류, V_C 는 출력 커패시터 양단 전압, R_o 는 부하저항 값을 나타내고 u_1 은 벡 모드의 제어 입력을 나타낸다.

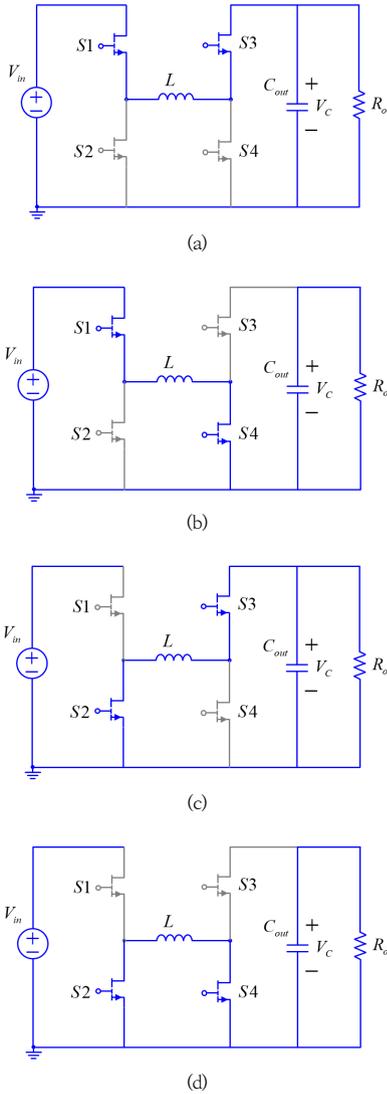


Fig. 5. Equivalent circuits depend on each switching state
(a) State 1, (b) State 2, (c) State 3, (d) State 4

Table 1. Gate Signals of Switching FETs

Control Input	State	Switching FET State	
u_1	0	S1 = OFF	S2 = ON
	1	S1 = ON	S2 = OFF
u_2	1	S3 = OFF	S4 = ON
	0	S3 = ON	S4 = OFF

반대로, S3 스위치가 OFF 되고 S4 스위치가 ON 된 상태일 때는 인덕터에 저장된 에너지가 부하 측으로 전달되지 않기 때문에 다음과 같이 나타낸다.

$$L \frac{di_L}{dt} = V_{in}u_1 - i_L \quad (3)$$

$$C \frac{dV_C}{dt} = -\frac{V_C}{R_o} \quad (4)$$

수식 (1)~(4)를 통해 제어 입력의 일반화를 진행하면 다음과 같은 수식으로 정리할 수 있다.

$$L \frac{di_L}{dt} = V_{in}u_1 - i_L - V_C(1-u_2) \quad (5)$$

$$C \frac{dV_C}{dt} = i_L(1-u_2) - \frac{V_C}{R_o} \quad (6)$$

여기서 u_2 는 부스트 모드의 제어 입력을 나타내며, 벡 모드와 부스트 모드의 스위칭 상태는 Table 1로 정리된다.

2.3 비선형 제어기 모델링

SMC는 Fig. 6과 같이, 슬라이딩 표면 s 로 정의되는 특수한 표면에 시스템의 상태를 적용하여 초기 조건에 대한 모든 값에 대해 안정적으로 시스템의 상태를 부여한다. 시스템의 모든 외란에 대해 시스템의 상태 공간이 슬라이딩 표면으로 수렴하도록 만든다면, 즉 제어하고자 하는 상태변수를 슬라이딩 평면상에 머무르도록 슬라이딩 평면의 기울기와 제어 입력 u 를 도출한다면 외란에 대해 강인한 비선형 제어기를 설계할 수 있다. 그리고 이러한 제어 입력 u 는 Lyapunov Stability Theorem에 의해 점근적인 안정성이 만족하도록 결정하여 시스템이 안정하다는 것을 보장할 수 있다. 슬라이딩 모드 제어 기법을 사용한 태양광 벡-부스트 컨버터의 블록 다이어그램은 Fig. 7과 같다.

상태변수 기반의 현대 제어 모델 수식 (7)의 상태변수 x 와 수식 (8)의 상태 함수 u 에 대해 슬라이딩 오차를 최소화하는 방향으로 설계한다면 파라미터에 의존하지 않는 불연속적인 제어 입력에 의해 모델 불확실성 및 파라미터 변동에 대한 강인한 제어 성능을 달성할 수 있다.

$$\begin{cases} \dot{x} = Ax + Bu \\ y = Cx \end{cases} \quad (7)$$

$$u = \frac{1}{2}(1 + \text{sign}(s)) \quad (8)$$

여기서 A, B, C 는 계수행렬, $\text{sign}(s)$ 는 슬라이딩 평면을 signum 함수에 대입한 결과를 나타낸다.

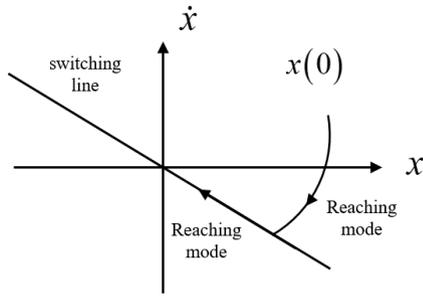
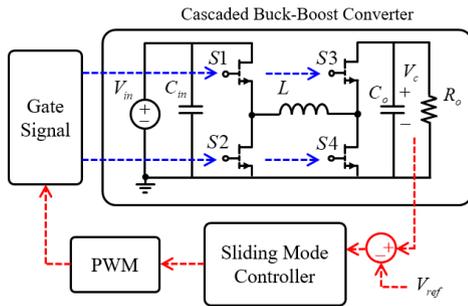
Fig. 6. Sliding surface s controlled by SMC method.

Fig. 7. Block diagram of Control System.

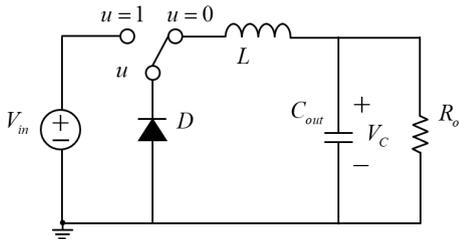


Fig. 8. Buck DC-DC converter circuit

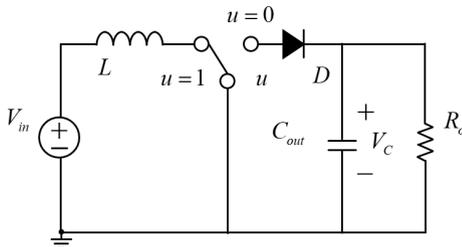


Fig. 9. Boost DC-DC converter circuit

2.4 스위칭 상태에 따른 SMC 설계

벽 모드 구동 시 컨버터는 Fig. 8과 같이 벽 컨버터 등 가회로와 같이 나타나고 이때 동적 모델은 다음과 같이 나타난다.

$$\dot{x}_1 = -\frac{1}{L}x_2 + u_1 \frac{V_{in}}{L} \quad (9)$$

$$\dot{x}_2 = \frac{1}{C}x_1 - \frac{1}{R_o C}x_2 \quad (10)$$

여기서 x_1 과 x_2 는 각각 전류와 전압에 대한 오차이다. 제어기를 설계하는 목적은 원하는 출력 전압을 일정하게 얻는 것이기 때문에 x_2 를 기준 전압(V_{ref})에 대한 실제 전압의 오차로 설정하고 정상상태에서 벽 컨버터의 기준 전압은 다음과 같이 나타난다.

$$\dot{x}_2 = \dot{V}_o = 0 \quad (11)$$

수식 (9)에서 x_1 은 스위칭 상태에 따라 결정되는 전류를 나타내기 때문에 수식 (10)에서 x_1 을 제어 입력으로 다루기 위해서는 원하는 기준 전류 x_1^* 를 설계해야 한다. 따라서 수식(11)을 수식(10)에 대입하여 기준 전류를 구하면 다음과 같다.

$$x_1^* = \frac{V_{in}}{R_o} \quad (12)$$

수식 (12)를 사용해 실제 전류 x_1 가 기준 전류를 추종할 수 있도록 슬라이딩 평면을 정의하면 수식 (13)과 같고, 이를 0으로 수렴시키기 위해 수식 (9)에서 제어 입력은 수식 (8)로 정의된다.

$$s = x_1 - x_1^* = 0 \quad (13)$$

위의 슬라이딩 모드가 존재하는 조건은 Lyapunov 안정성 이론에 기반하여 슬라이딩 표면과 Lyapunov 함수의 도함수가 음의 한정함수(Negative definite function)일 때 존재할 수 있고 수식으로 나타내면 다음과 같다.

$$\dot{V} = s\dot{s} < 0 \quad (14)$$

위 수식을 만족하는 슬라이딩 모드 범위를 구하면 x_2 는 다음과 같이 설정된다.

$$0 < x_2 < V_{in} \quad (15)$$

슬라이딩 모드 상태는 슬라이딩 범위를 제한한다. 수식 (8)을 이용해 결정된 제어 입력에는 시스템을 최적화 시키는 제어 이득이 없기 때문에 SMC 구조에 의해 슬라이딩 모드 가능 영역이 미리 결정된다. 이를 통해 정상 상태에서 출력 전압이 입력 전압보다 낮은 강압형 벡 컨버터의 정의에 의해 수식 (14)는 벡 모드 제어기에 적합함을 증명할 수 있다.

부스트 모드의 동적 모델은 Fig. 9에서 KCL과 KVL을 사용하여 다음 수식으로 나타낼 수 있다.

$$\dot{x}_1 = -u_2 \frac{1}{L} x_2 + \frac{V_{in}}{L} \quad (16)$$

$$\dot{x}_2 = u_2 \frac{1}{C} x_1 - \frac{1}{R_o C} x_2 \quad (17)$$

부스트 모드에서도 벡 모드와 마찬가지로 수식 (13)으로 나타난 Lyapunov 조건을 사용해 정리하면 슬라이딩 평면은 수식 (13)과 같이 0을 만족하고 아래 관계를 만족해야 한다.

$$s = \dot{x}_1 - \dot{x}_1^* \quad (18)$$

상태 변수의 정상상태 값은 기준으로 설정한 값과 일치하고 상수이며 수식 (18)에 수식 (13)을 대입하면 다음과 같은 관계를 얻을 수 있다.

$$x_2 > V_{in} \quad (19)$$

따라서 슬라이딩 모드가 존재하는 범위는 x_2 가 입력 전압보다 높을 때 만족하며, 부스트 컨버터 정의에 알맞은 범위로 설정되는 것을 확인할 수 있다.

3. 시뮬레이션

시뮬레이션에 사용된 직렬형 벡-부스트 컨버터 시뮬레이션 모델은 PSIM 프로그램을 이용해 구현하였고

Fig. 10과 같다. 시뮬레이션에 사용된 파라미터는 Table 2와 같다. 시뮬레이션 결과는 과도상태 응답성과 정상상태 안정성을 판별하기 위해 기존의 PI 제어기와 SMC 제어기의 비교분석을 진행한다.

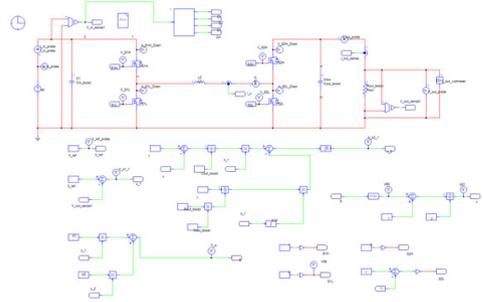
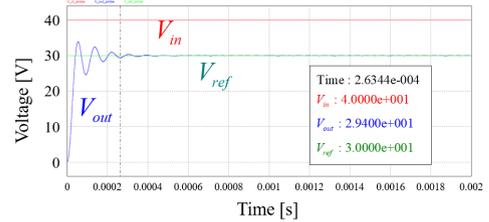
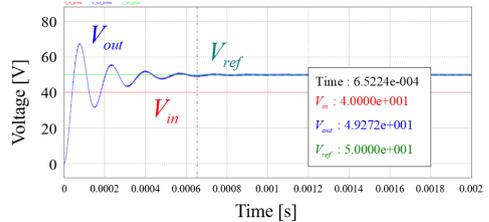


Fig. 10. PSIM Model of Cascaded Buck-Boost Converter



(a)



(b)

Fig. 11. PSIM Simulation waveform with PI Controller (V_{ref} , V_{in} , V_{out}) (a) Buck mode, (b) Boost mode

Fig. 11은 기존 PI 제어를 사용한 직렬형 벡-부스트 컨버터의 벡 모드와 부스트 모드의 출력파형을 나타낸다. 총 시뮬레이션 시간은 2ms로 설정되었다. Fig. 11(a)는 40V DC 입력전압 (V_{in})에 대해 30V 지령전압 (V_{ref})을 추종하는 벡 모드의 실제 출력전압 (V_{out}) 파형을 나타내며, Fig. 11(b)는 40V DC 입력전압에 대해 50V 지령전압을 추종하는 실제 출력전압 파형을 나타낸

다. Fig. 12는 슬라이딩 모드 제어기를 사용한 직결형 벡-부스트 컨버터의 벡 모드와 부스트 모드의 출력파형을 나타낸다. 총 시뮬레이션 시간은 PI 제어기 파형보다 $\frac{1}{4}$ 배가 되는 0.5ms로 설정되었다. Fig. 12(a) 파형은 40V DC 입력전압(V_{in})에 대해 30V 지령전압(V_{ref})을 추종하는 벡 모드의 실제 출력전압(V_{out}) 파형을 나타내며, Fig. 12(b)는 40V DC 입력전압에 대해 50V 지령전압을 추종하는 부스트 모드의 실제 출력전압 파형을 나타낸다.

Fig. 13은 본문에서 설정한 슬라이딩 모드 평면과 슬라이딩 오차가 0으로 수렴하는지 확인할 수 있는 결과파형이다. 모든 동작 모드에 대해 슬라이딩 평면과 슬라이딩 오차가 $68\mu s$ 이내로 0.1 값에 수렴하는 것을 확인할 수 있다.

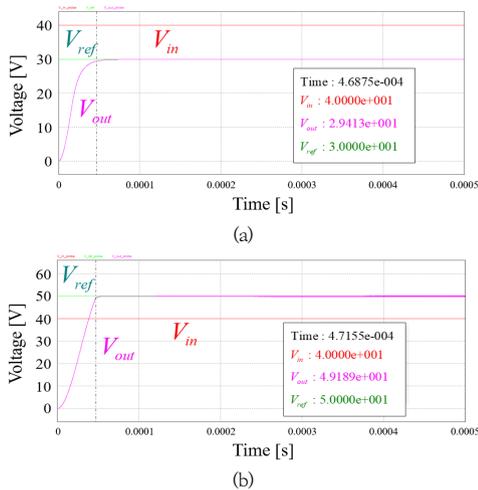


Fig. 12. PSIM Simulation waveform with SMC (V_{ref} , V_{in} , V_{out}) (a) Buck mode, (b) Boost mode

Table 2. Simulation Parameters

Parameters	Value	unit
Input Voltage Range	30~50	V
Rated Power	700	W
Switching IC Model	GS61008T	EA
Switching frequency	200	kHz
Main Inductor	42.9	uH
Input Capacitor	10	uF
Output Capacitor	15	uF
Output Resistance	1.75~5	Ω

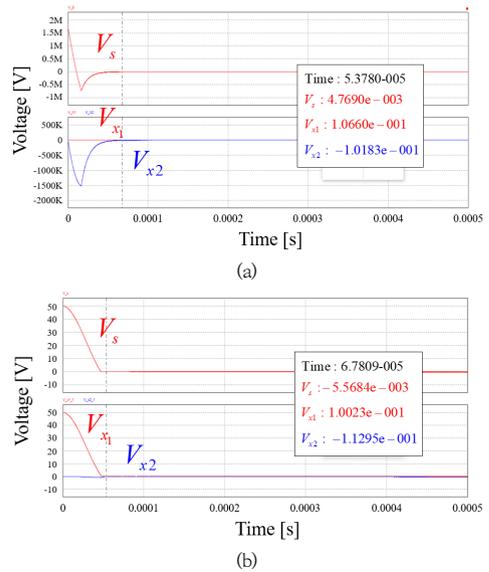


Fig. 13. PSIM Simulation waveform with SMC (s, x_1, x_2) (a) Buck mode, (b) Boost mode

Table 3. Settling Time of Transient Responses

Controller	Operation Mode	Settling Time
PI Controller	Buck Mode	263.4 [ns]
	Boost Mode	652.2 [ns]
Sliding Mode Controller	Buck Mode	46.8 [ns]
	Boost Mode	47.1 [ns]

4. 결론

본 논문에서는 태양광 발전 시스템의 MPPT 성능 향상을 위해 비절연형 모듈단위 전력변환 컨버터를 구현하고 전압 변동분 추종 성능 향상과 과도응답 속응성 및 정상상태 안정성 개선을 위해 비선형 제어 기법인 SMC를 적용하여 시뮬레이션을 진행했다. 시뮬레이션 결과 기존 PWM 기반 PI 제어기는 약 10% 이상의 오버슈트와 언더슈트를 동반하며 기준 전압을 추종하는 것을 확인할 수 있다. 반면 비선형 제어기는 벡 모드에서 기존 PI 제어(263.4[ns])보다 5.6배 빠른 46.8[ns] Settling Time을 보이며, 부스트 모드에서 기존 PI 제어(652.2[ns])보다 13.8배 빠른 47.1[ns]의 Settling Time을 보이는 것을 확인하였다. 이를 통해 본 논문에서 제안한 모듈단위 전력변환 시스템의 비선형 제어 기법에 따른 개선된 제어 성능에 대한 타당성을 검증하였다.

References

- [1] G. K. Taneja, G. Modi, B. Singh, A. Verma and V. Narayanan, "An Improved Control Strategy to Reduce Operating Hours of DG Genset in Solar PV-BES-DG Based AC Microgrid," in IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 59, no. 3, pp. 3713-3726, May-June 2023. DOI: <https://dx.doi.org/10.1109/TIA.2023.3246464>
- [2] H. Oufettoul, N. Lamdhine, S. Motahhir, N. Lamrini, I. A. Abdelmoula and G. Aniba, "Comparative Performance Analysis of PV Module Positions in a Solar PV Array Under Partial Shading Conditions," in IEEE Access, vol. 11, pp. 12176-12194, 2023. DOI: <https://dx.doi.org/10.1109/ACCESS.2023.3237250>
- [3] M. M. R. Ahmed et al., "Mitigating Uncertainty Problems of Renewable Energy Resources Through Efficient Integration of Hybrid Solar PV/Wind Systems Into Power Networks," in IEEE Access, vol. 12, pp. 30311-30328, 2024. DOI: <https://dx.doi.org/10.1109/ACCESS.2024.3370163>
- [4] K. Tytelmaier, O. Husev, O. Veligorskyi and R. Yershov, "A review of non-isolated bidirectional dc-dc converters for energy storage systems," 2016 II International Young Scientists Forum on Applied Physics and Engineering (YSF), Kharkiv, Ukraine, 2016, pp. 22-28. DOI: <https://dx.doi.org/10.1109/YSF.2016.7753752>
- [5] F. Caricchi, F. Crescimbin, G. Noia and D. Pirolo, "Experimental study of a bidirectional DC-DC converter for the DC link voltage control and the regenerative braking in PM motor drives devoted to electrical vehicles," Proceedings of 1994 IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition - ASPEC'94, Orlando, FL, USA, 1994, pp. 381-386 vol.1. DOI: <https://dx.doi.org/10.1109/APEC.1994.316373>
- [6] S. Zhu, W. Han, J. Chen and Q. Liu, "Closed-Form Solution for ZVS and Minimum Current of Cascaded Buck + Boost Converters Eliminating Instantaneous Inductor Current Detection," in IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 38, no. 10, pp. 12455-12468, Oct. 2023. DOI: <https://dx.doi.org/10.1109/TPEL.2023.3292897>
- [7] T. Urkin and M. M. Peretz, "Digital CPM Controller for a Non-Inverting Buck-Boost Converter With Unified Hardware for Steady-State and Optimized Transient Conditions," in IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 35, no. 8, pp. 8794-8804, Aug. 2020. DOI: <https://dx.doi.org/10.1109/TPEL.2020.2965554>
- [8] Y. Guan, Y. Wang, D. Xu and W. Wang, "A 1 MHz Half-Bridge Resonant DC/DC Converter Based on GaN FETs and Planar Magnetics," in IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 32, no. 4, pp. 2876-2891, April 2017. DOI: <https://dx.doi.org/10.1109/TPEL.2016.2579660>
- [9] S. S. Alharbi and M. Matin, "Experimental evaluation of medium-voltage cascode gallium nitride (GaN) devices for bidirectional DC-DC converters," in CES Transactions on Electrical Machines and Systems, vol. 5, no. 3, pp. 232-248, Sept. 2021. DOI: <https://dx.doi.org/10.30941/CESTEMS.2021.000227>
- [10] Y. Wang, W. Zhang and C. Xue, "Adaptive Continuous Sliding Mode Control of Buck Converters With Multidisturbances Based on Zero-Crossing Detection," in IEEE Access, vol. 10, pp. 72643-72657, 2022. DOI: <https://dx.doi.org/10.1109/ACCESS.2022.3188760>
- [11] Y. Zhao, W. Qiao and D. Ha, "A Sliding-Mode Duty-Ratio Controller for DC/DC Buck Converters With Constant Power Loads," in IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 50, no. 2, pp. 1448-1458, March-April 2014. DOI: <https://dx.doi.org/10.1109/TIA.2013.2273751>
- [12] B. Zhu, S. Su, Y. Zhou and C. Sun, "Cascaded Buck-Boost converter based on energy storage unit and its control method," Proceedings of 6th Asia Conference on Power and Electrical Engineering (ACPEE), IEEE, Chongqing, China, 2021, pp. 1471-1477. DOI: <https://dx.doi.org/10.1109/ACPEE51499.2021.9437045>

안 정 호(Jung-Ho Ahn)

[정회원]



- 2020년 2월 : 대구대학교 전자전 기공학부 학사 졸업
- 2020년 3월 ~ 현재 : 한양대학교 대학원 전기공학과 석박통합과정

<관심분야>

모터 제어, 인버터 설계 및 제어, 자기부상, 전력전자

다이저리양(Jialiang Dai)

[정회원]



- 2019년 6월 : 중국 Ningbo 대학교 Electrical Engineering and Automation 학사 졸업
- 2020년 8월 ~ 현재 : 한양대학교 대학원 전기공학과 석박통합과정

<관심분야>

모터 제어, 인버터 설계 및 제어, 전력전자, UAM

박 성 준(Seong-Jun Park)

[정회원]



- 2022년 4월 ~ 현재 : ㈜더블유피
선임연구원

<관심분야>

전력계통, 신재생에너지

진 창 성(Chang-Sung Jin)

[정회원]



- 2001년 3월 ~ 2003년 2월 : 한양
대학교 공과대학 전기공학과(공학
석사)
- 2003년 2월 ~ 2007년 6월 : 대우
일렉트로닉스 선임연구원
- 2007년 3월 ~ 2011년 2월 : 한양
대학교 공과대학 전기공학과(공학
박사)
- 2011년 2월 ~ 2018년 3월 : 한화지상방산 국방로봇팀
책임연구원
- 2018년 4월 ~ 현재 : 원광대학교 전기공학과 조교수

<관심분야>

모터 설계 및 제어, 신재생에너지, 전기자동차, 드론