

PV모듈용 SI-MISO NIBB 컨버터의 인덕터 실효전류 저감 방안

김승민, 조승진, 최민영, 김승수, 김동희[†]
 전남대학교 전기공학과

Inductor Ripple Current Reducing Method of SI-MISO NIBB Converter for PV Module

Seung-Min Kim, Seung Jin Jo, Min Yeong Choe, Seung-Su Kim, Dong-Hee Kim[†]
 Department of Electrical Engineering, Chonnam National University

ABSTRACT

본 논문에서는 태양광 시스템에 사용하는 다중입력 단일출력 NIBB(Non-Inverting Buck-Boost)컨버터 스위치 위상에 따른 인덕터 실효전류 변화에 대한 분석을 수행한다. 단일 인덕터 사용으로 개별 PV모듈의 Buck단 스위치 동작에 의해 인덕터 앞단에 인가되는 전압이 변화하며, Boost단 스위치 동작에 의해 인덕터 뒷단에 인가되는 전압이 변화한다. 이를 활용하여 각 단 컨버터의 스위치 동작에 따른 인덕터의 실효전류변화를 분석하며, 최소 실효전류를 보이는 스위치 위상각을 도출한다.

서론

최근 환경오염 등의 이슈로 인해 신재생에너지의 수요가 증가하며, 이중 태양광 발전시스템은 대표적인 환경 친화적인 에너지로써 전 세계적으로 수요가 증가하고 있다. 이러한 태양광 발전 시스템은 출력에서 최대 전력을 발전하기 위해 Maximum Power Point Tracking(MPPT) 동작을 수행한다. 이러한 MPPT 동작은 일반적으로 중앙 인버터를 통해 직 병렬로 연결된 태양광 모듈을 최대전력지점에서 구동한다. 하지만 일사량에 따라 PV모듈의 출력전력은 변화하며, 부분 음영 등 다양한 이유로 스트링 내 몇 개의 PV모듈의 MPP가 변화하면, 그 외의 PV모듈은 더 높은 출력을 낼 수 있음에도 불구하고 직렬연결의 특성상 부분 음영이 발생한 PV모듈에 의해 그 출력이 제한되는 문제를 보인다. 이러한 PV모듈의 출력 전력 불균형 현상에 대한 해결방안으로 각 PV 모듈마다 DCDC컨버터(DC Power Optimizer)를 추가하며, 중앙 인버터를 통해 계통 연계하는 방안이 있다. 이는 일부 모듈에서 부분 음영 또는 고장이 발생해도 개별 PV모듈의 MPPT 제어를 통해 전체시스템의 출력이 감소하지 않는다. 하지만 각 PV모듈에 DCDC컨버터를 추가해야 하므로 PV모듈 개수에 따른 시스템 단가가 상승하는 문제가 발생한다. 이는 적은 수동소자로 구성 가능하여 저렴한 단가로 시스템 구축이 가능한 장점을 가지는 Single Inductor Multi Input Single Output Non Inverting Buck-Boost converter (SI-MISO NIBB)를 PV모듈의 DCDC 컨버터로 활용하여 해결할 수 있다. 이러한 구성은 Buck단을 통해 기본적인 MPPT제어를 수행하며, 부분 음영으로 인해 Boost를 통한 MPPT제어가 필요할 때 Boost단 컨버터를 활용한 MPPT제어를 수행한다. 이를 통해 적은 수동소자를 활용하여 개별PV모듈의 MPPT 동작을 수행할 수 있다^[1].

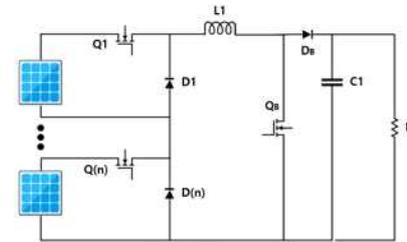


그림 1 단일 인덕터 다중입력 단일출력 벡-부스트 컨버터
 Fig. 1 SI MISO-NIBB converter

하지만, 단일 인덕터 사용과 개별 PV모듈의 일사량에 따른 시비율 차이로 인해 인덕터의 실효전류는 최적화되지 않고 수동소자의 손실증가를 초래한다. 그러므로 해당 토폴로지에서 인덕터 실효전류 저감에 대한 연구가 필요하다. 본 논문에서는 SI-MISO NIBB 컨버터에서 스위치 위상 변경을 통해 인덕터 실효전류를 최소화를 위한 스위치의 제어방안을 제안한다. 각 Buck단 스위치의 위상에 따라 변화하는 실효전류에 대한 분석을 수행하며, Boost단 스위치의 위상 변화에 따라 변화하는 실효전류에 대한 분석을 통해 인덕터의 실효전류를 최소화한다.

2. SI MISO-NIBB 컨버터 분석

2.1 기존 SI MISO-NIBB 컨버터 동작

태양광 발전시스템에서 부분 음영 등의 원인으로 각 PV모듈의 전력 불균형이 발생하였을 때 개별 PV모듈의 MPPT동작을 수행해야한다. 이를 위해 각 PV모듈마다 최대 출력점의 전압보다 컨버터의 출력전압이 낮은 경우 Buck동작을 수행해야 하며, 반대로 PV모듈의 최대 출력전압보다 컨버터의 출력전압이 높을 경우 Boost동작을 수행해야한다. 그림 1의 SI MISO-NIBB 컨버터는 단일 인덕터로 구성된 다중입력, 단일출력 Buck-Boost 컨버터로 기존 Buck-Boost 컨버터와 동일하게 각 PV모듈의 MPPT 동작을 수행할 수 있으면서 수동소자의 개수를 저감할 수 있다. 그림 2는 SI MISO-NIBB 컨버터의 주요 동작 모드를 나타낸다. 이는 PV모듈의 최대 출력전압과 컨버터 출력 전압의 관계에 따라 Buck&Buck 모드와 Buck&Boost 모드로 구분할 수 있다. 먼저, Buck-Buck 모드는 각 PV모듈 출력전압의 합이 컨버터 출력전압보다 클 때 동작한다. 이 경우 Boost단 스위치는 개방상태가 되며, 각 PV모듈의 Buck단을 통해 MPPT제어를 수행한다. Buck&Boost 모드는 각 PV모듈 출력전압의 합이 컨버터 출력전압보다 작을 때

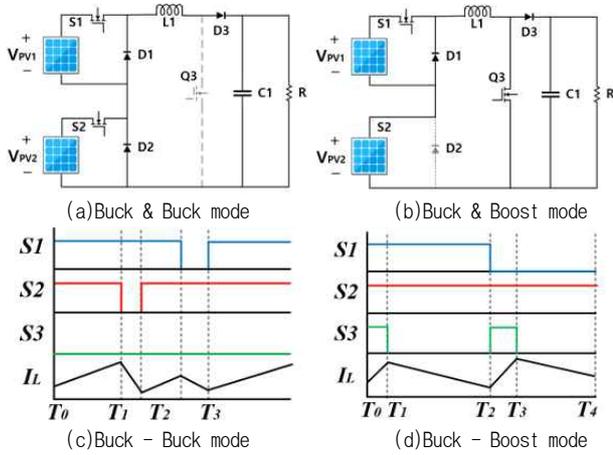


그림 2 SI MISO-NIBB 2개 모드별 동작 및 인덕터 전류
Fig. 2 Equivalent circuit and waveform by two mode

동작한다. 이 경우 각 PV모듈의 출력전류를 비교하여 가장 높은 출력전류를 갖는 PV모듈은 Buck단 스위치를 단락 하며, Boost단 스위치 동작을 통해 MPPT를 수행하여 스트링의 전류를 유지시키는 동작을 한다. 이를 통해 SI MISO-NIBB 컨버터는 한 스트링 내의 PV모듈 전체의 MPPT 동작을 수행한다.

2.2 SI MISO-NIBB 인덕터 실효전류 저감 방법

SI MISO-NIBB 컨버터는 1개의 인덕터를 사용하며, 해당 인덕터에 흐르는 실효전류를 통해 수동소자의 손실이 발생한다. 인덕터의 실효전류는 평균전류와 리플전류의 합으로 구성되며, 이중 인덕터 평균전류는 MPPT동작에 의해 결정되므로 리플 전류를 통해 인덕터 실효전류를 저감할 수 있다. 리플 전류 저감을 위해 인덕터 전류 변화량에 대한 분석이 필요하며, 이는 아래 식 (1)와 같다. 또한 인덕터 전류는 시비율에 따라 전류 상승구간과 전류 하강구간으로 구분가능 하며, 이에 의한 최대전류는 식 (2), 최소전류는 식 (3)으로 표현할 수 있다. 인덕터 양단의 전압 차이에 따라 인덕터 리플전류 변화량과 최대전류, 최소전류는 비례하게 변화한다. SI MISO-NIBB 컨버터의 인덕터의 앞 단은 직렬로 구성된 Buck단과 연결되어 있으며, 뒷단은 Boost단과 연결되어 있으므로 각 단의 스위치 동작에 따라 인덕터 양단의 전압은 변화한다. 이를 활용하여 SI MISO-NIBB 컨버터의 인덕터 리플전류를 저감할 수 있다.

$$di_L/dt = (V_A + V_B)/L \quad (1)$$

$$i_{L,max} = I_L + ((1/2) \times ((V_A - V_B)/L) \times DT) \quad (2)$$

$$i_{L,min} = I_L - ((1/2) \times ((V_A - V_B)/L) \times DT) \quad (3)$$

2.2.1 Buck&Buck 모드 인덕터 실효전류 저감 방안

SI MISO-NIBB 컨버터가 그림 2(a)와 같이 Buck&Buck 모드로 동작할 때 각 PV모듈의 MPPT동작은 Buck단 스위치로 수행하며, Boost단 스위치는 개방상태이다. 이로 인해 인덕터 뒷단은 항상 Boost 출력전압이 인가된다. 모드에서 그림 2(c)에 따른 인덕터 전류 변화량은 식 (4)~(6)과 같이 구분한다.

$$di_L/dt = (V_{PV1} + V_{PV2}) - V_{out}/L \quad , T_0 - T_1 \quad (4)$$

$$di_L/dt = (V_{PV1} - V_{out})/L \quad , T_1 - T_2 \quad (5)$$

$$di_L/dt = (V_{PV2} - V_{out})/L \quad , T_2 - T_3 \quad (6)$$

Buck&Buck 모드의 Buck단 스위치 시비율의 합이 1 이상일 경우에는 Buck단 스위치 위상에 상관없이 항상 동시에 턴 온 되는 식 (4)의 구간이 발생하며, 해당 구간에서 인덕터 전류는 상승한다. 해당 조건을 식 (2)에 대입하면 인덕터 전류 상승 구간에서 양단의 전압은 위상 변화에도 동일하므로 인덕터 최대전류는 인덕터 전류 상승 시간과 비례한다. 또한 PV1과 PV2의 최대출력전압을 비교하였을 때 만약 PV1의 전압이 PV2전압보다 클 경우 식 (5)보다 식 (6)구간에서 더욱 급격한 전류 변화량이 발생한다. 이러한 조건을 활용하여 인덕터 리플전류 저감을 위해 식 (4)의 전류 상승 시간을 최소화하여 최대 리플전류 크기를 줄이며, 전류 하강 시작지점에 식 (5)의 급격한 전류 변화량을 두어 더욱 빠르게 낮은 실효전류를 갖도록 위상제어를 수행해야한다. 위의 조건을 모두 만족하는 경우는 S1 턴 온 시점과 S2 턴 오프 시점이 동일한 위상에 위치할 때이며, 이를 통해 Buck&Buck모드일 때 인덕터 실효전류를 저감한다.

2.2.2 Buck&Boost 모드 인덕터 실효전류 저감 방안

SI MISO-NIBB 컨버터가 그림 2(d)와 같은 Buck&Boost 모드의 경우 PV1과 PV2 중 부분 음영 또는 고장에 의해 한 PV 모듈의 최대 출력전압이 감소하였을 때 스트링 전류를 유지하기 위해 정상동작 중인 PV모듈을 Boost단 스위치를 통해 MPPT 제어를 수행한다. 그림 2(b)의 PV1은 부분 음영 모듈로 기존의 Buck단을 통해 제어를 수행하며, PV2는 정상동작 모듈로 Boost단을 통해 제어를 수행하여 S1은 단락되며, 이로 인해 인덕터에 항상 PV2의 전력이 공급된다. 모드에서 그림 2(d)에 따른 인덕터 전류 변화량은 식 (7)~(10)과 같이 구분한다.

$$di_L/dt = ((V_{PV1} + V_{PV2}) - 0)/L \quad , T_0 - T_1 \quad (7)$$

$$di_L/dt = ((V_{PV1} + V_{PV2}) - V_{out})/L \quad , T_1 - T_2 \quad (8)$$

$$di_L/dt = (V_{PV2} - 0)/L \quad , T_2 - T_3 \quad (9)$$

$$di_L/dt = (V_{PV2} - V_{out})/L \quad , T_3 - T_4 \quad (10)$$

Buck&Boost모드에서는 Boost단 스위치가 동작하므로 Boost 단 스위치 턴 온되는 식 (7)과 식 (9)의 구간이 발생하며, 해당 구간에서 인덕터 전류는 상승한다. 반대로 Boost단 스위치 턴 오프되는 식 (8)과 (10)의 구간에서는 인덕터 전류는 하강한다. 이는 앞의 Buck&Buck모드와는 다르게 전류 상승구간의 시간을 조절할 수 없으며, 고정된 시간동안 상승한다. 그러므로 인덕터 전류 상승구간에서 전류 변화량 최소화를 통해 인덕터 최대전류 크기를 저감 해야한다. PV2의 Buck스위치는 항상 단락 상태 이므로 모든 구간에서 인덕터 앞단은 V_{PV2} 가 인가되어 있다. 그러므로 PV1의 Buck 스위치가 턴 오프 되는 식 (10) 구간에서 가장 적은 전류 변화량이 발생한다. 이러한 조건을 활용하여 리플전류 저감을 위해서는 전류 상승 구간인 식 (7), (9)구간 시작 지점에서 작은 전류 변화량을 갖는 식 (10)구간을 두어 낮은 실효전류 값에서 완만하게 전류가 상승하며, 상대적으로 낮은 인덕터 최대 전류를 갖도록 위상제어를 수행해야한다. 위의 조건을 모두 만족하는 경우는 S3 턴 온 시점과 S1 턴 오프 시점이 동일할 위상에 위치할 때이며, 이를 통해 Buck&Boost 모드일 때 인덕터 실효전류를 저감할 수 있다.

3. 시뮬레이션 검증

위의 분석과정을 통해 각 단 스위치 위상에 따른 SI MISO-NIBB 컨버터의 인덕터 실효전류 변화를 확인하였다. 이를 검증하기 위해 표 1의 파라미터를 활용하여 시뮬레이션을 진행하였다. 그림 3과 그림 4는 Buck&Boost 모드와 Buck&Boost 모드에서 스위치 위상에 따른 인덕터 전압과 전류 결과를 나타낸다. Buck&Boost 모드에서는 $V_{PV1} < V_{PV2}$ 이므로, S2 턴 온 시점과 S1의 턴 오프 시점이 동일한 위상에 위치할 때 가장 낮은 인덕터 실효전류를 보인다. Buck&Boost 에서는 S3 턴 온 시점과 S1 턴 오프 시점이 동일할 위상에 위치할 때 가장 낮은 인덕터 실효전류를 보인다.

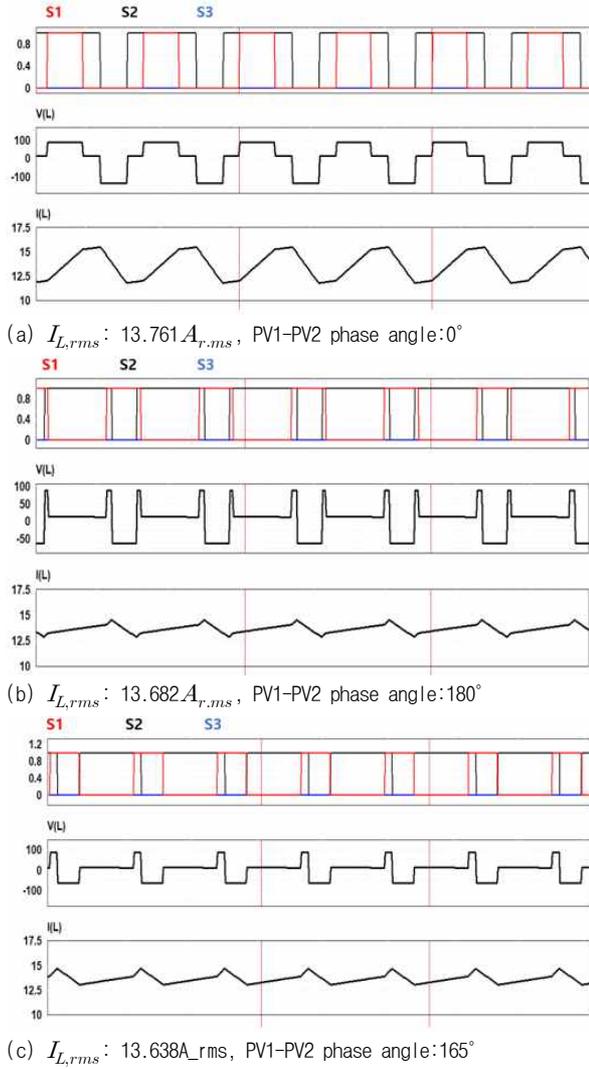


그림 3 Buck&Boost 모드 스위치 위상별 인덕터 전압 및 전류
Fig. 3 waveforms in Buck&Boost mode at Inductor voltage, current

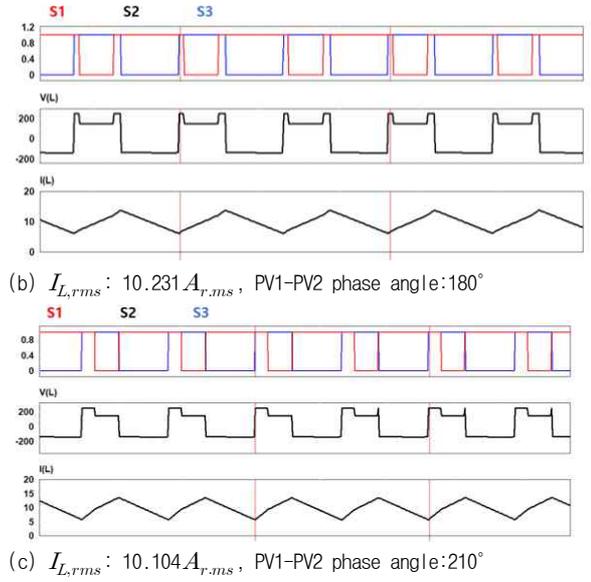
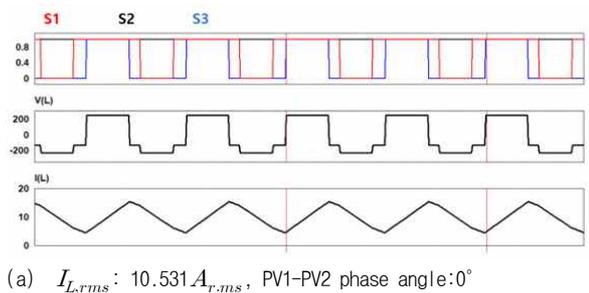


그림 4 Buck&Boost 모드 스위치 위상별 인덕터 전압 및 전류
Fig. 4 waveforms in Buck&Boost mode at Inductor voltage, current

표 1 시뮬레이션 파라미터
Table 1 Simulation parameters

$PV_{1,VOC}$	200 V	$PV_{2,VOC}$	200 V
$PV_{1,ISC}$	12 A	$PV_{2,ISC}$	12 A
$PV_{1,V_{MPP}}$	75 V	$PV_{2,V_{MPP}}$	150 V
$PV_{1,I_{MPP}}$	5 A	$PV_{2,I_{MPP}}$	10 A
L	100 uH	C	100 uH
f	100 kHz	R	50/10

4. 결론

본 논문에서는 SI MISO-NIBB 컨버터의 인덕터 실효전류 저감을 위한 스위치 위상 제어방안을 제안하였다. 이를 위해 각 단 스위치 동작에 따른 인덕터 전류변화에 대한 분석을 수행하였으며, 실효전류 저감을 위한 최적의 스위치 위상의 특징을 도출하였다. 이에 대한 검증을 위해 시뮬레이션을 진행하였으며, 스위치 위상에 따라 인덕터 실효전류가 변화함을 확인하였으며, 도출한 최적 스위치 위상에서 최소 실효전류를 갖음을 확인하였다.

본 연구는 2023년도 중소벤처기업부의 기술개발지원사업의 지원에 의한 연구임 [S3054962]

참 고 문 헌

- [1] Y. Jia, T. Liu, Y. Tai, H. Wu and Y. Xing, "A SiC-Based Dual-Input Buck-Boost Converter with Independent MPPT For Photovoltaic Power Systems," IECON 2018 - 44th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society, Washington, DC, USA, 2018, pp. 1640-1645