



고효율을 위한 태양광 마이크로인버터 시스템



1. 소개

최근 지속적인 에너지 소비 증가로 인해 증가하는 환경오염과 자원 고갈에 따른 대체 에너지에 대한 연구가 지속적으로 성장하고 있다. 여러 대체 에너지를 이용한 발전 방식 중 태양광 발전은 공해가 없으며, 필요한 장소에 필요한 만큼 태양광 판넬을 설치하여 독립적인 발전을 수행할 수 있는 큰 장점이 있지만, 일사량에 의존적이며, 설치장소가 한정적이고, 초기 투자비와 발전단가가 비교적 높은 것이 단점으로 지적되고 있다. 기존 태양광 발전 시스템은 설치 비용과 제조 비용을 절감하기 위해 여러 개의 태양광 판넬을 하나의 전력 변환기에 연결하는 중앙 집중식 인버터를 많이 사용하였다. 하지만 그림자 효과와 같은 문제로 인해 부분적으로 태양광 발전량이 감소했을 때, 전력 변환기 전체의 발전량이 줄어드는 단점이 있다.

이러한 중앙 집중식 태양광 발전의 단점을 보완하기 위해, 태양광 모듈 직접형 컨버터(Module integrated converter, MIC)라고 불리는 마이크로인버터(Microinverter) 시스템이 개발되었다. 마이크로인버터는 개별 태양광 판넬에 각각 인버터를 설치해 모듈 단위로 생산 전력을 분산하는 시스템이다. 이 시스템은 기존의 중앙 집중식 인버터보다 태양광 판넬 당 더 많은 에너지를 변환할 수 있고, 개별 모듈은 각각 MPPT 제어 기능을 갖추고 있어 그림자 효과 및 기기 노화 등의 문제를 개선하였다.

일반적으로 소용량 인버터 시스템의 품질은 시스템 효율과 계통 전류의 전고조파왜곡율(Total harmonic distortion, THD)에 영향을 받는다. 따라서 소용량 인버터 시스템은 효율, 비용, 크기, 무게 등 여러가지 요소를 고려하여 세심하게 설계되어야 한다. 이러한 이유로, H5와 H6, HERIC(Highly efficient and reliable inverter concept), NPC(Neutral point

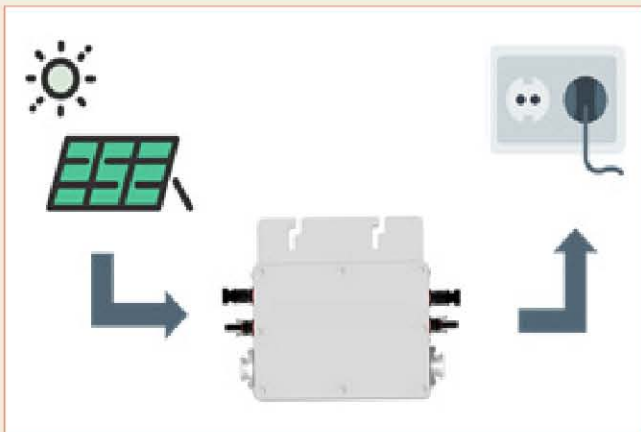


그림 1 마이크로인버터

clamped), Dual-paralleled-buck, 브릿지리스 토폴로지 등 많은 고효율 단상 인버터들이 연구되었다. 여러 토폴로지 중 브릿지리스 인버터는 4개의 스위치와 2개의 SiC 다이오드로 구성된 형태로서, 상단에 배치된 스위치는 계통 전압의 방향에 따라 온오프 동작을 수행하고, 하단에 배치된 스위치로 발전 전류를 생성한다. 브릿지리스 인버터는 계통의 반주기 동안 하나의 스위치와 필터 인덕터에 의한 손실만 발생하기 때문에 다른 인버터 토폴로지보다 효율이 높다.

본 연구는 브릿지리스 인버터가 적용된 마이크로인버터 시스템의 품질 향상을 위한 제어 기법을 제안한다. 제안한 기법은 PFC-DBC(Deadbeat control)로, 브릿지리스 인버터를 수학적 모델링한 후 미래의 전류 상태를 간단하게 계산 및 예측하여 제어하는 방식이다. 제안한 기법을 통해 기존 전류 제어 기법으로 인해 발생하는 계통 전류의 고조파 성분을 줄일 수 있기 때문에 고효율 및 고품질의 마이크로인버터를 설계할 수 있다.

2. 마이크로인버터시스템의 구성

본 연구에 적용된 마이크로인버터의 브릿지리스 인버터 시스템은 그림 2와 같다. 브릿지리스 인버터의 스위치 동작은 계통 전압으로부터 얻은 계통 위상각에 의해 결정된다. 그림 3은 브릿지리스 인버터의 스위칭 상태를 나타낸다. 계통 전압의 양의 반주기 동안 SW1은 항상 온 상태, SW4는 PWM 모듈레이터에 따라 온, 오프 상태를 반복한다. 반대로, 계통 전압의 음의 반주기 동안 SW2는 항상 온 상태, SW3는 PWM 모듈레이터에 따라 온, 오프 상태를 반복한다. 이에 따른 단상 브릿지리스 인버터의 전류 흐름도를 그림 4와 같이 나타낸다. 단상 브릿지리스 인버터의 전류 흐름도는 스위칭 상태에 따라 4가지로 나뉘어진다. 그림 4(a)와 (b)는 계통 전압의

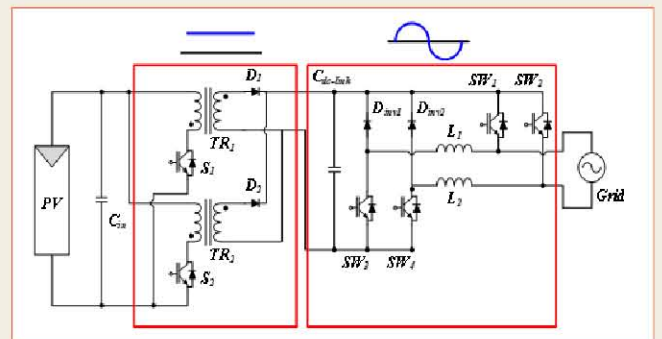


그림 2 브릿지리스 인버터가 적용된 마이크로인버터

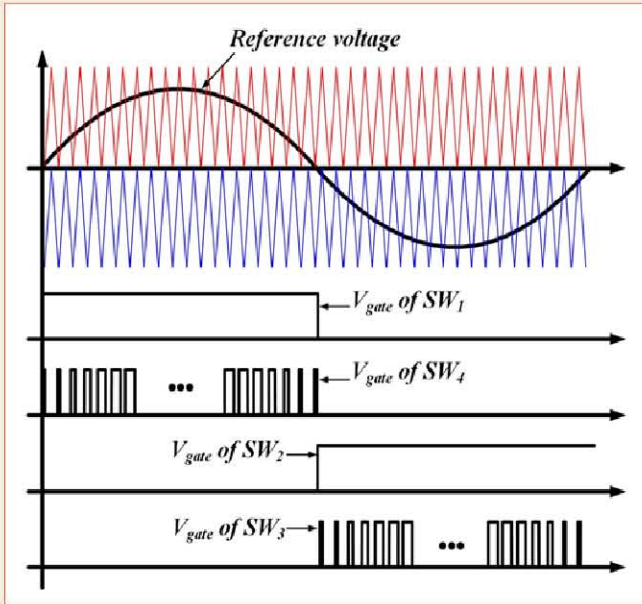


그림 3 브릿지리스 인버터의 스위칭 상태

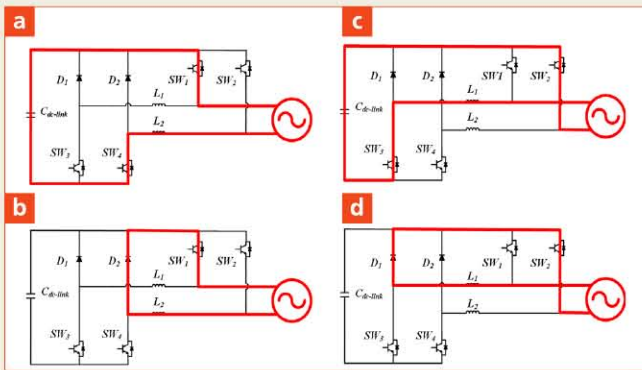


그림 4 브릿지리스 인버터의 전류 흐름도

양의 반주기 동안의 전류 흐름도를 나타낸다. 그림 4(a)와 같이 SW1과 SW4가 온이 되면 직류단 커패시터의 에너지가 계통과 L2과 연결되어 L2에 에너지가 공급되게 된다. 그림 4(b)와 같이 SW1은 온이 되고, SW4는 오프가 되면 L2에 쌓여있던 에너지가 D2를 통해 계통으로 흐르게 된다. 그림 4(c)와 (d)는 계통 전압의 음의 구간의 전류 흐름도로서 계통 전압의 양의 구간과 비슷한 동작을 한다.

3. 고효율을 위한 마이크로인버터의 브릿지리스 인버터 데드비트 제어

본 연구에서 제안한 PFC-DBC 전류제어기는 브릿지리스 인버터 시스템을 수식적으로 모델링하고, 이를 바탕으로 미래의

표 1 모델링된 인덕터 전류의 기울기

스위치 온 상태	스위치 오프 상태
$S_{ON} = \frac{di}{dt} = \frac{V_{dlink} - V_{grid}}{L_2}$	$S_{OFF} = \frac{di}{dt} = \frac{-V_{grid}}{L_2}$

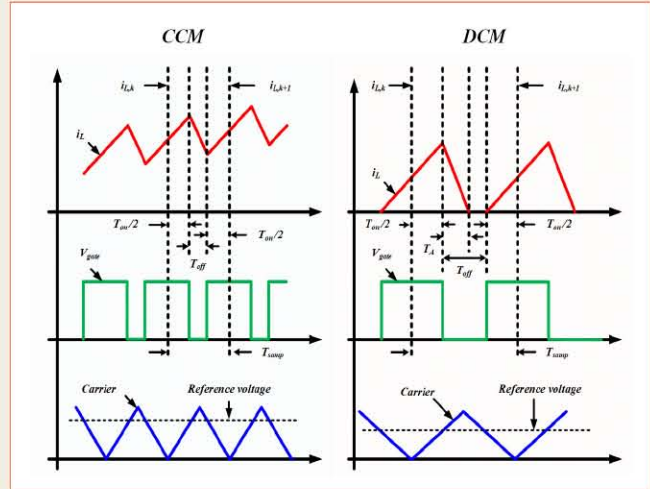


그림 5 각 모드에서의 스위칭 상태와 전류

값을 예측하여 실제 값이 예측한 값을 추종할 수 있도록 한다. 따라서 시스템을 수식적으로 모델링하는 과정이 반드시 선행되어야 한다. PFC-DBC 전류제어기의 제어 대상은 인덕터에 흐르는 전류이기 때문에 그림 3을 이용하여 스위치 온, 오프 상태에 따른 인덕터 전류의 기울기를 표 1과 같이 모델링해야 한다.

일반적으로 인덕터에 흐르는 전류는 전류 연속 도통 모드 (Continuous Conduction Mode, CCM)와 전류 불연속 도통 모드(Discontinuous Conduction Mode, DCM)로 동작한다. 대용량 인버터의 경우 필터 인덕터의 인덕턴스가 충분히 크기 때문에 CCM만 고려하지만, 마이크로인버터와 같이 시스템의 크기와 부피를 고려하여 작게 설계된 필터 인덕터의 인덕턴스가 작은 경우 DCM도 같이 고려되어야 한다. 또한, CCM에서는 인덕터 전류 센서가 샘플링하는 지점, 즉 스위치 ON 듀티의 절반 지점이 인덕터의 평균 전류가 되어 제어에 사용할 수 있으나, DCM에서는 샘플링된 전류가 평균 전류가 아니기 때문에 샘플링된 전류로 제어를 할 경우 전류의 왜곡이 발생한다. 그림 5는 CCM과 DCM에서 브릿지리스 인버터의 스위칭 상태에 따른 인덕터 전류를 나타낸다. 제안하는 PFC-DBC 방법은 $[k+1]$ 번째 전류를 수식으로 나타내고, 식 (1)에서 모델링한 인덕터 전류의 기울기를 이용하여 $[k+1]$ 번째 전류와 예측 지령 전류의 차이를 0으로 만들어 줌으로써

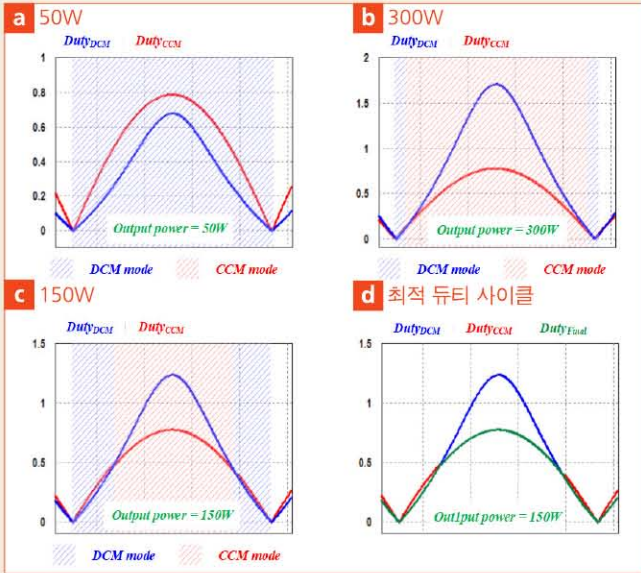


그림 6 출력 전력에 따른 듀티 사이클

표 2 제안하는 PFC-DBC의 최적 듀티 사이클

모드	최적의 듀티 사이클
DCM	$D_{CCM} = \frac{1}{T_{samp}} \sqrt{\frac{2i_{ref}T_{samp}}{S_{ON,k} \left(1 - \frac{S_{ON,k}}{S_{OFF,k}}\right)}}$
CCM	$D_{CCM} = \frac{i_{ref} - i_{L,k} - (S_{OFF,k}T_{samp})}{T_{samp}(S_{ON,k} - S_{OFF,k})}$

전류 제어를 수행한다. 각 모드에서의 [k+1]번째 전류와 이를 이용하여 계산한 최적의 듀티 사이클을 표 2에 나타내었다. 표 2에서 나타난 듀티 사이클을 전류의 크기에 따라 나타내면 그림 6과 같다.

제안하는 PFC-DBC 방법은 DCM 듀티 사이클과 CCM 듀티 사이클을 항상 계산 및 비교하여 더 작은 값이 적용되도록 하여 모든 구간에서 평균 전류 제어가 되도록 한다. 이를 바탕으로 제안하는 PFC-DBC 방법의 제어 블록도를 그림 7과 같이 나타내었다.

제안하는 PFC-DBC 방법은 모델 기반 제어 방법이기 때문에 시스템의 안정도와 정확성을 향상시키기 위해 반드시 파라미터 추정 기법이 적용되어야 한다. 수식적인 모델링에 사용되는 인덕턴스는 일정한 값이기 때문에 실제 인덕턴스 값과 차이가 발생하면 전류 제어가 불안정해지기 마련이다. 본 연구에서는 전류 센서를 통해 샘플링된 전류와 모델링에 사용된

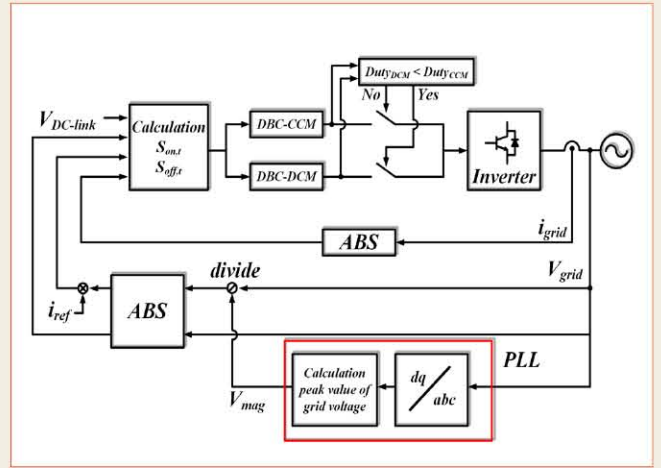


그림 7 제안하는 PFC-DBC 전류 제어 블록도

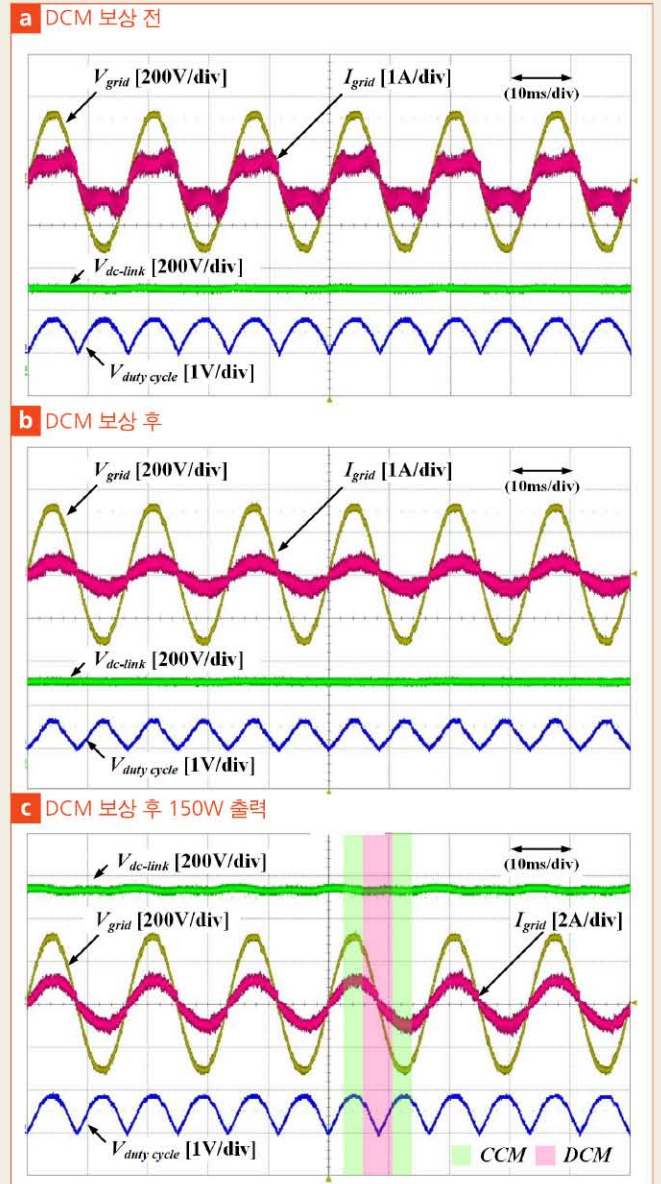


그림 8 PFC-DBC 적용 시 DCM 보상 실험 결과

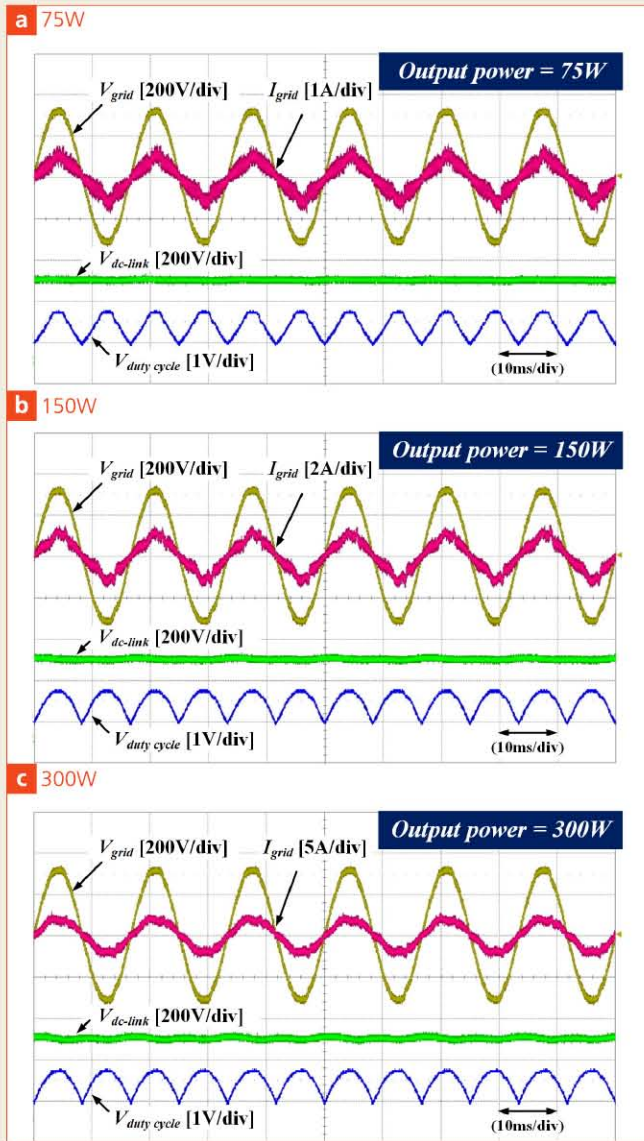


그림 9 기존 PFC-PI 실험 결과

인덕턴스로 계산된 평균 전류의 차이를 이용하여 실제 인덕턴스를 추정하는 기법을 사용하였다. 추정된 인덕턴스가 모델링에 사용되는 인덕턴스 파라미터에 적용된 인덕턴스의 불일치로 인한 제어기의 발산을 억제할 수 있다.

제한하는 PFC-DBC 제어기의 성능을 검증하기 위해, 일반적으로 많이 사용되는 PFC-PI 제어기와 실험을 통해 비교하였다. 먼저 그림 8은 제한하는 PFC-DBC 제어 방법이 적용된 상태에서 DCM 보상 적용 유무에 따른 계통 전류의 파형을 나타낸다. 그림 8(a)는 출력 전력이 50 [W]인 상황에서 DCM 보상이 적용되기 전의 계통 전류 파형을 나타낸다. DCM에서는 필터 인덕터에 흐르는 전류가 불연속적으로 흐르기 때문에 전류 센서로 얻은 값으로 제어를 수행하게 되면 계통 전류에 왜곡이 발생한다. 그림 8(b)는 출력 전력이 50 [W]인 상황

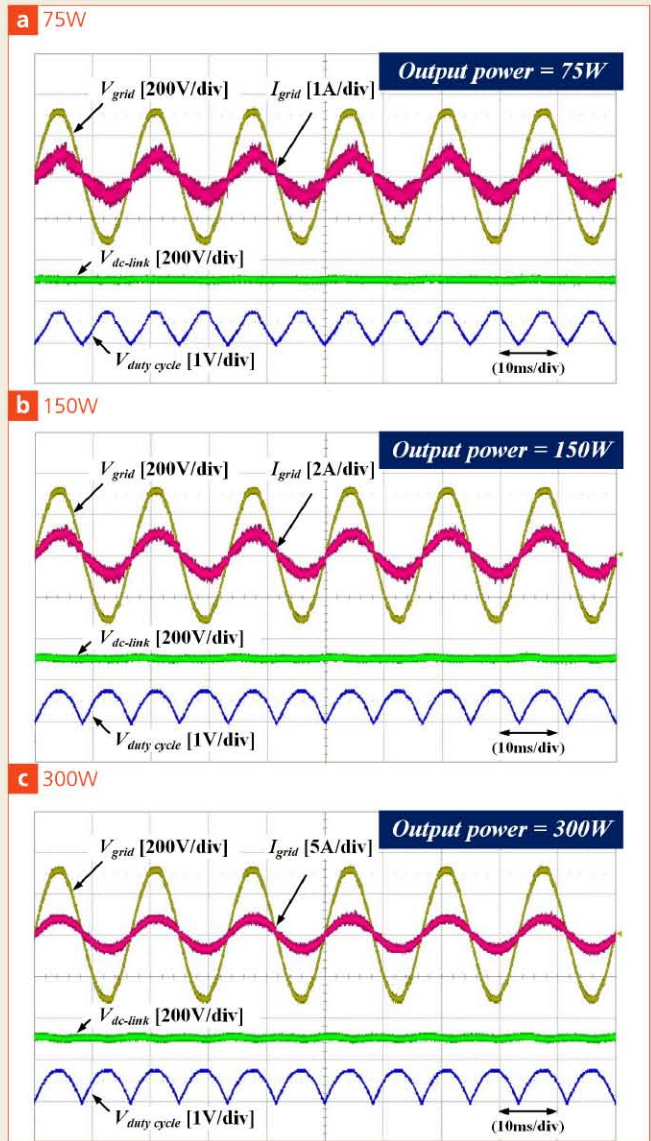


그림 10 제한하는 PFC-DBC 실험 결과

에서 DCM 보상이 적용된 후의 계통 전류 파형을 나타낸다. 표 8에서 계산된 DCM 모드 보상 듀티 사이클을 적용하였기 때문에 계통 전류에 왜곡이 저감되었다. 그림 8(c)는 출력 전력이 150 [W]인 상황에서 DCM 보상이 적용된 후의 계통 전류 파형을 나타낸다. 기존 PFC-PI 제어 방법과 제한하는 PFC-DBC 제어 방법은 항상 DCM 모드의 듀티 사이클과 CCM 모드의 듀티 사이클을 계산하고, 실시간으로 서로 비교한 뒤 더 작은 값을 최종 듀티 사이클로 사용한다. 그림 8(c)의 경우에는 계통 전류가 작은 구간에서는 DCM 모드로 동작하고, 계통 전류가 큰 구간에서는 CCM 모드로 동작한다.

그림 9는 출력 전력이 각각 75 [W], 150 [W], 300 [W]일 때 PFC-PI 제어 방법의 실험 결과 파형을 나타낸다. PFC-PI 전류 제어기는 제어기의 대역폭으로 인해 계통 전류의 왜곡을

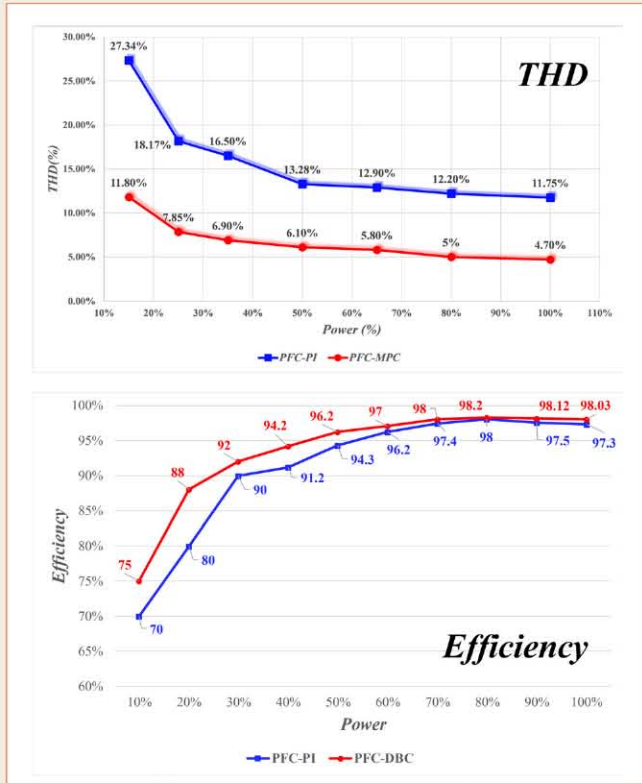



그림 11 PFC-PI와 PFC-DBC 방법의 성능 비교

감소시키는데 한계가 있다. 계통 전류의 왜곡은 제어기의 대역폭을 넓게 함으로써 속응성을 향상시켜 개선시킬 수 있으나, 제어기가 불안정해지고, 발산할 수 있다. 일반적으로 계통 전류의 품질을 검증할 때, 최대 부하점에서 계통 전류의 THD를 측정한다. 본 연구의 마이크로인버터는 300 [W]급이므로, PFC-PI 전류 제어기를 사용했을 때 최대 부하점에서의 THD는 약 11.75 [%]로 출력되었다.

그림 10은 출력 전력이 각각 75 [W], 150 [W], 300 [W]일 때 제안하는 PFC-DBC 제어 방법의 실험 결과 파형을 나타낸다. 계통 전류 파형을 그림 7의 기존 PFC-PI 제어 방법과 비교하였을 때, 계통 전류의 왜곡이 급격히 줄어들었음을 확인할 수 있다. 제안하는 PFC-DBC는 정확한 모델링에 의해 계산되는 예측 지령 전류를 사용하기 때문에 제어기의 대역폭에 영향을 받지 않아 속응성이 빠른 장점을 가지고 있다. PFC-PI 제어 방법과의 성능 비교를 위해 최대 부하점에서 계통 전류 THD를 측정한 결과 약 4.7 [%]로 출력되었다.

그림 11은 PFC-PI 방법과 제안하는 PFC-DBC 방법의 출력 전력에 따른 계통 전류 THD와 마이크로인버터의 효율을 비교한 그래프를 나타낸다. 제안하는 PFC-DBC 방법이 모든 측면에서 기존 PFC-PI 제어보다 우수한 성능을 갖추고 있다는 것을 확인하였다.

4. 결론

계통 연계형 인버터는 신재생 에너지를 변환하여 계통으로 발전시킬 때, 인버터에서 출력되는 계통 전류의 품질을 국제 표준 규정(IEEE-519, IEEE-1547 등)에 맞춰야 한다. 일반적으로 계통 전류의 품질은 THD로 나타내는데, THD가 낮을수록 고조파 성분이 적게 포함되어 계통 전류의 왜곡이 적다는 것을 의미한다. 일반적으로 마이크로인버터는 PI 제어기를 기반으로 구성된 PFC-PI 제어 방법을 적용하는데, PI 제어기의 대역폭 설정에 따라 제어기의 속응성이 변화되어 제어기가 발산하고, 불안정한 상태가 될 수 있으며, 계통 전류에 왜곡이 발생하는 단점이 있을 수 있다. 본 연구는 이러한 단점을 보완하기 위한 PFC-DBC 제어 방법을 제안하였다. 제안하는 PFC-DBC 제어 방법은 시스템의 모델링을 바탕으로 미래 지령 전류를 예측하기 때문에 속응성이 우수할 뿐만 아니라, 계통 전류의 품질을 개선시킨다. 또한, 잘못된 파라미터 값으로 인해 발생하는 시스템 모델링의 미스매치를 파라미터 추정 알고리즘을 통해 보상함으로써 시스템 모델링이 잘못되어도 원활한 제어를 수행할 수 있도록 한다. 제안한 PFC-DBC 제어 방법은 기존 PFC-PI 제어 방법과 실험 결과 비교를 통해 우수한 성능을 검증하였고, 본 연구 결과를 이용하여 마이크로인버터 및 소용량 인버터의 계통 전류 품질 향상 및 시스템 효율 향상에 효과적으로 사용할 수 있을 것으로 기대한다. 

참고/문헌

- [1] J. H. Lee, J. S. Lee, and K. B. Lee, "Current sensorless MPPT method for a PV flyback microinverters using a dual-mode," in 2014 International Power Electronics Conference (IPEC-Hiroshima 2014 - ECCE ASIA), Hiroshima, 2014, pp. 532-537.
- [2] J. H. Lee, J. S. Lee, and K. B. Lee, "Current sensorless MPPT control method for dual-mode PV module-type interleaved flyback inverters," Journal of Power Electronics, Vol. 15, No. 1, pp. 54-64, Jan. 2015.
- [3] J. H. Lee and K. B. Lee, "A dead-beat control for bridgeless inverter systems to reduce the distortion of grid current," IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, Vol. 6, No. 1, pp. 151-164, Mar. 2018.