고효율 400W급 태양광 Module Integrated Converter 개발

이성호[1], 김수아[1], 김민성[1], 구태홍[2], 김수홍[2], 최정환[2], 허동영[2], 권봉환[1]
포항공과대학교[1], LG 이노텍[2]

High-efficiency 400W Module Integrated Converter for PV applications

Sung Ho Lee[1], Soo A Kim[1], Min Sung Kim[1], Tae Hong Goo[2], Soo Hong Kim[2],
Jung Hwan Choi[2], Dong Young Huh[2], Bong Hwan Kwon[1]
Pohang University of Science and Technology (POSTECH)[1], LG Innotek[2]

ABSTRACT

본 논문에서는 고효율, 저가격의 400W급 태양광 Module Integrated Converter (MIC)를 소개한다. 제안하는 MIC는 Interleaved flyback 토폴로지를 기반으로, 계통 주기 내에서 DCM과 CCM의 모든 동작 영역을 활용할 수 있게 설계되어 도통 손실 및 전력 용량을 개선한다. 또한 새로운 출력 제어 전류 알고리즘을 통해 기존의 Flyback의 CCM 영역에서의 제어문제를 해결하여 개발된 Flyback MIC의 실효성을 획득한다. 최종적으로 400W급 시제품을 제작하여 타당성 검증 및 결과를 제시한다.

1. 서 론

최근 AC module 태양광 시스템은 MPPT 효율 개선, 안전성 및 신뢰도 향상, 유지보수 편이와 같은 다양한 장점을 근거로 차세대 태양광 시스템으로 주목받고 있다. 이 태양광 시스템에는 개별 태양광 모듈의 독립적인 운영을 위해 단일 PCS, MIC가 적용된다.

MIC의 성능지표는 전력변환효율, 제작 단가, 신뢰도 등이 있다[1]. Single stage flyback MIC는 언급된 성능지표를 충족시켜 AC module 태양광 시스템에서 보편적으로 사용되고 있다. flyback은 동작 모드에 따라 DCM 또는 CCM flyback으로 구분된다. CCM flyback MIC의 경우, 정격 또는 일정 전력 이상에서 CCM로 동작하도록 설계할지라도 전체 계통 주기 내에서 DCM과 CCM 영역 모두 존재하기 때문에 실제로는 Hybrid mode를 가지는 flyback MIC라 할 수 있다. 이 MIC 토폴로지는 DCM 영역만 존재하는 flyback MIC에 비해 전류 스트레스 및 리플이 감소에 따른 전력 손실 개선 및 전력 용량 향상과 같은 이점이 있다. 하지만 CCM 영역의 우반면 영점에 의해 제어기의 이득 값이 제한되어 기준치 추종 및 외란 제거와 같은 제어 성능을 보장하지 못해 전력품질에 악영향을 준다.[2]

본 논문에서는 고효율의 400W급 태양광 MIC를 제안한다. 제안하는 MIC는 Hybrid mode를 가지는 Interleaved flyback 토폴로지를 기반으로 고효율, 고용량 획득한다. 또한, 새로운 출력 전류 제어 알고리즘을 통해 CCM 영역의 우반면 영점에 의한 제어문제를 극복하고 개발된 MIC의 실효성을 획득한다.

2. 고 효율 400W 태양광 MIC 개발

2.1 시스템 구성 및 특징

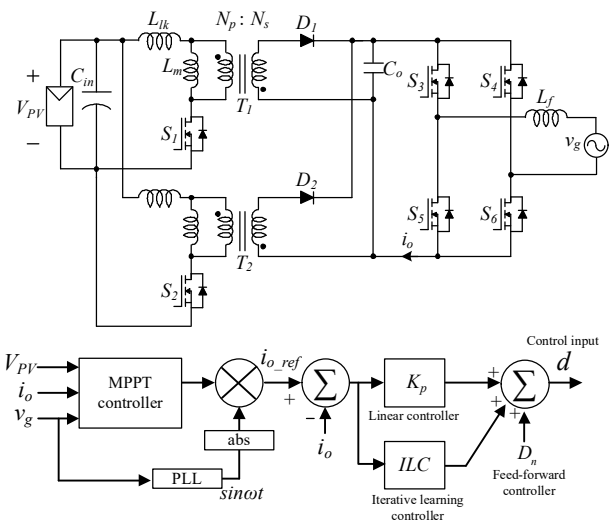

그림 1 개발된 400W급 flyback MIC 회로도 및 제어 알고리즘

그림 1의 개발된 400W급 flyback MIC는 2개의 flyback이 병렬로 연결된 회로와 S_3~S_6로 구성된 Unfolding bridge로 이루어져 있다. flyback은 Interleaved 방식으로 고 주파수 스위칭 동작하며, 제어 입력 d에 의해 저전압 직류로 표현되는 태양광 전력을 계통 주파수 2배의 정류된 교류 전력으로 변환한다. 한편 Unfolding bridge는 계통 주파수로 동작하며 변환된 전력을 계통으로 주입한다.

I&C MPPT 알고리즘과 PLL을 통해 출력 전류의 기준치 i_{o_ref}을 산출해 출력 전류 제어가 수행된다. 그림 1의 flyback은 Hybrid mode를 가지기 때문에 모든 동작 영역을 수반할 수 있는 알고리즘이 필요하고, 제어 대상인 계통 주파수와 고조파 성분에 대해 높은 이득 값을 가져야 제어 성능이 보장된다.

2.2 개발된 MIC의 전류 제어 알고리즘

개발된 MIC의 출력 전류 제어 알고리즘은 선형 제어기, 반복학습제어기 (ILC) 그리고 feed forward 제어기로 구성된다.

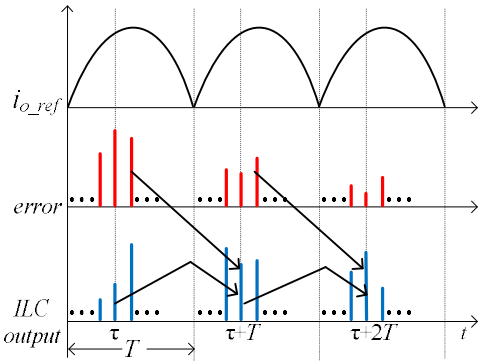

그림 2 개발된 태양광 MIC에 적용된 ILC 개념도

선형 제어기는 비례 제어기로써 시스템의 안정성을 유지한다. 이때 이득 값 k_p는 CCM 영역의 우반면 영점을 고려해 낮게 설계된다. ILC는 실제 출력 전류 제어에 기여한다. 그림 2와 같이 계통이라는 일정 주기 T를 가지는 시스템에서 τ라는 시점의 error 값과 제어입력 값을 다음 주기의 시점 $\tau+T$의 제어입력 값을 산출하는데 사용된다. 이와 같은 과정을 반복하여 ILC는 정상상태 오차를 제거하고 완벽히 기준치를 추종할 수 있는 이상적인 제어 입력 제공한다.

DCM 영역은 CCM 영역과 달리 시스템 이득 값이 매우 낮다. Hybrid mode flyback의 경우, 시스템 안정성을 위해 k_p를 낮게 설정하면 모든 주파수 영역의 시스템 이득 값이 감소하게 된다. 하지만 ILC 적용 시, 시스템과 연동된 계통 주파수 및 고조파 성분에 대해 높은 이득 값을 제공하여 기준치 추종 및 외란 제거와 같은 제어 성능을 향상시킨다. 이는 기존의 PI 제어기와 달리 높은 k_p 없이 특정 주파수에 대한 시스템 이득 값을 상승시킨다.

Feed forward 제어기는 PV 및 계통 전압의 영향에 의한 외란을 제거하여 제어 환경을 개선한다. 개발된 MIC에서는 각 영역에 적합한 Hybrid mode feed forward 제어기를 제안하여 보다 효과적으로 외란을 제거할 수 있고 전류 제어기의 부담을 경감시킨다. 이때의 feed forward 제어기의 출력 값 D_n은 수식 (1)과 같다.

$$D_n = \begin{cases} \dfrac{\sqrt{2P_oL_mf_s}}{V_{PV}}|\sin\omega t|, & DCM\ region \\ \dfrac{|v_g|}{|v_g|+\dfrac{N_S}{N_P}V_{PV}}, & CCM\ region \end{cases} \quad (1)$$

3. 실험 결과

새로운 출력 전류 제어 알고리즘을 적용하여 400W급 태양광 MIC를 개발하였다. 실험조건은 스위칭 주파수 50kHz, 계통 전압은 220V_{rms}, 60Hz이며, 태양광 모듈 공칭 전압은 60V로 설정하였다. 변압기의 자화 인덕턴스 L_m은 MIC의 효율과 크기를 고려하여 50uH로 설계 되었다.

그림 3은 기존의 PI제어기와 제안하는 출력 전류 제어 알고리즘의 제어 성능을 비교한 시뮬레이션 결과이다. 기존의 제어 시스템을 적용 시, 기준치 추종을 위해 k_p를 증가 시키면 시스템이 불안정해진다. 반면 제안하는 알고리즘을 적용 시, 시스템

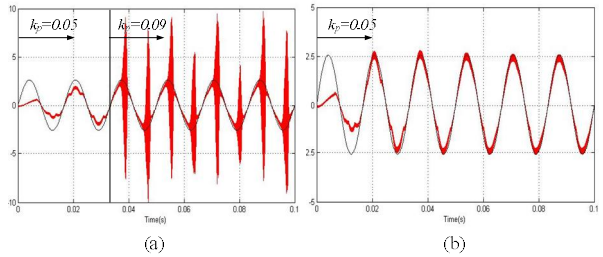

그림 3 전류 제어 알고리즘 별 성능 비교
(a) 기존의 제어 알고리즘 (b) 제안하는 전류 제어 알고리즘

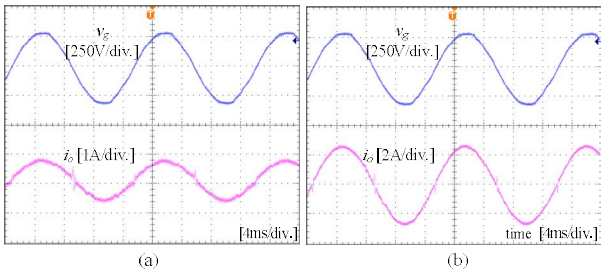

그림 4 개발된 태양광 MIC의 계통 전압 및 전류 파형
(a) 25% 부하조건 (b) 정격 부하 조건

의 안정성을 유지하면서 기준치를 명확히 추종함을 확인할 수 있다.

그림 4는 부하 별 계통 전압 및 전류 파형이다. 그림 3에서 보듯이 계통 전류가 부하 용량에 관계없이 왜곡 없는 정현파임을 확인할 수 있으며, 정격에서 THD는 2.5%이다. 또한 최대 효율 및 정격 효율은 각각 96.3%, 96%로 측정되었다.

4. 결 론

본 논문에서는 고효율, 저가격의 400W급 태양광 flyback MIC를 소개하였다. 개발된 MIC는 DCM과 CCM 모든 영역을 활용하여 전력변환효율 및 전력 수용력을 향상시켰다. 또한 기존의 CCM 영역의 우반면 영점에 의한 제어 문제를 극복할 수 있는 새로운 출력 제어 알고리즘을 개발하여 제안하는 MIC의 실효성을 획득하였다.

"본 연구는 미래창조과학부 및 정보통신기술진흥센터의 ICT명품인재양성사업의 연구결과로 수행되었음" (IITP 2015 R0346 15 1007)

참 고 문 헌

[1] F. F. Edwin, W. Xiao, and V. Khadkikar, "Dynamic modeling and control of interleaved flyback module integrated converter for PV power applications," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, Vol .61, No. 3, pp. 1377 1388, Nov. 2010.

[2] Y. Li, and R. Oruganti, "A low cost flyback CCM inverter for AC module application," *IEEE Trans. Power Electron.*, Vol. 27, No. 3, pp. 1295 1303, Mar. 2012.