

태양광 발전 시스템용 AC 모듈 집적형 전력변환기의 구성 방식에 따른 손실 분석

강승현*, 손원진**, 안상준**, 이병국**†

인제대학교 전자공학과*, 성균관대학교 전자전기컴퓨터공학과**

Loss Analysis according to Configuration Method of AC Module Integrated Converter for Photovoltaic System

Sunghyun Kang*, Won-Jin Son**, Sangjoon Ann**, and Byoung Kuk Lee**†

Department of Electronic Engineering, Inje University*

Department of Electrical and Computer Engineering, Sungkyunkwan University**

ABSTRACT

본 논문은 태양광 (photovoltaic, PV) 발전 시스템용 AC 모듈형 집적형 전력변환기 (module integrated converter, MIC)의 구성 방식에 따른 전력 손실을 비교·분석한다. 대표적으로 사용되는 플라이백 컨버터를 기반으로 하는 1-stage와 2-stage 구조의 AC 모듈형 PV-MIC를 비교하고, PSIM 시뮬레이션과 수식을 이용하여 전력 손실을 계산한다.

1. 서론

최근 태양광 (photovoltaic, PV) 발전 시스템은 태양 전지 모듈의 개별 maximum power point tracking (MPPT) 제어가 가능하고 부분 음영 조건에서 전지의 최대 출력 제어가 가능한 모듈 집적형 전력변환기 (module integrated converter, MIC)에 대한 연구가 활발하게 진행되고 있다. PV-MIC는 DC 모듈 방식과 AC 모듈 방식으로 구분되며, 이 중 시스템 용량 증설이 용이하고, DC 배선이 요구되지 않아 전기적 아크나 화재에 대한 위험이 적은 AC 모듈 방식에 관한 연구가 최근 활발하게 이루어지고 있다^[1]. AC 모듈 방식은 DC-DC 컨버터와 DC-AC 인버터가 결합된 2-stage 시스템이 주로 사용된다. 하지만 2-stage 시스템의 DC-link용 전해 커패시터는 수명이 짧고 부피가 크다는 단점이 있다. 이를 해결하기 위해 DC-link를 제거한 1-stage 구조의 AC 모듈 방식이 연구되고 있으며, 그 중 사용되는 소자 수가 적고 가격 및 부피 절감이 가능한 플라이백 인버터에 관한 연구가 활발히 진행 중이다. 2-stage 시스템은 1-stage 시스템 대비 2차 측 풀 브릿지 인버터가 추가되기 때문에 추가 손실이 발생할 수 있는 반면, 1-stage 시스템은 2-stage 시스템 대비 소자 수는 적지만 플라이백 1차 측 전류의 피크 값이 크기 때문에 1차 측 스위치의 도통 및 스위칭 손실이 크게 발생할 수 있다.

따라서 본 논문에서는 AC 모듈형 PV-MIC의 구성 방식에 따른 효율 비교를 위해 1-stage와 2-stage 구조의 PV-MIC의 손실 분석을 진행한다. 1-stage 시스템 토폴로지는 플라이백 인버터를 선정하였으며, 2-stage 시스템 토폴로지는 1-stage 구조와의 비교를 위해 1차 측에는 플라이백 컨버터와 2차 측에 풀 브릿지 인버터를 사용한 시스템을 선정하였다. 선정된 토폴로지를 바탕으로 PSIM 시뮬레이션과 데이터 시트를 이용하여 수식적 손실 분석을 진행한다.

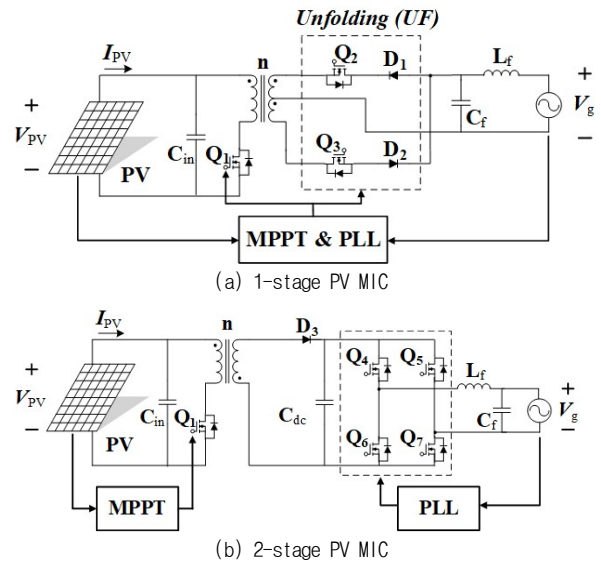


그림 1 PV-MIC의 AC 모듈 구성 방식
Fig. 1 Configuration methods of AC module PV-MIC.

표 1 PV-MIC 시스템 사양

Table 1 System specifications of PV-MIC

Parameter	Value	Parameter	Value
$P_{PV,MPPT}$	360 [W]	V_g	220 [V_{rms}]
$V_{PV,MPPT}$	40 [V]	Grid frequency	60 [Hz]
$I_{PV,MPPT}$	9 [A]	Switching frequency	100 [kHz]

2. PV-MIC의 구성 및 손실 분석

2.1 PV-MIC의 구성

그림 1은 본 논문에서 손실 비교·분석을 위한 두 가지 방식의 AC 모듈형 PV-MIC의 회로를 나타낸다. 그림 1 (a)는 1-stage 구조의 플라이백 인버터로서 1차 측의 스위치에 MPPT 제어와 계통 연계 운전을 위해, 계통 전압의 위상과 주파수를 검출하는 phase locked loop (PLL) 제어가 모두 적용된다. 반면에, 그림 1 (b)의 2-stage 구조의 PV-MIC는 플라이백 컨버터와 풀 브릿지 인버터로 구성되어 있다. 첫 번째 stage인 플라이백 컨버터의 스위치에는 MPPT 제어가 적용되고, 두

표 2 PV-MIC 시스템 소자

Table 2 System components of PV-MIC

Component	Model
Flyback Converter Switch, Q_1	IXFA60N25X3 (250V/60A)
Flyback Inverter Switch, Q_2 - Q_3	STD6N90K5 (900V/6A)
Flyback Diode, D_1 - D_3	CD214C-S3M (1000V/100A)
Transformer Core	PC95 PQ35/35
Inverter Switch, Q_4 - Q_7	IPA60R280CFD7 (650V/31A)

번째 stage인 풀 브릿지 인버터의 스위치에는 PLL 제어가 적용된다. 표 1은 360 [W]급 PV-MIC의 시스템 파라미터를 나타내며, 표 2는 사용된 소자의 정보를 나타낸다.

2.2 손실 분석

본 절에서는 AC 모듈형 PV-MIC의 구성 방식에 따른 비교를 위해 시뮬레이션 및 데이터 시트를 기반으로 손실을 계산한다. 손실은 주요 전력 반도체 소자와 변압기의 손실을 비교하였으며, 출력 필터는 제외하였다.

2.2.1 플라이백 스위치 손실

플라이백 컨버터에 사용된 전력 반도체 소자인 MOSFET에서 발생하는 손실은 크게 도통 손실과 스위칭 손실로 나타내며, 전체 손실은 식 (1)-(4)를 통해 계산한다^[2].

$$P_{MOSFET.loss} = P_{MOSFET.cond} + P_{MOSFET.sw} + P_{MOSFET.C_{oss}} \quad (1)$$

$$P_{MOSFET.cond} = I_{pri_rms}^2 \cdot R_{ds(on)} \quad (2)$$

$$P_{MOSFET.sw} = \frac{1}{2} \cdot V_{ds} \cdot I_p \cdot (t_{d(off)} + t_f) \cdot f_s \quad (3)$$

$$P_{MOSFET.C_{oss}} = \frac{1}{2} \cdot C_{oss} \cdot V_{ds}^2 \cdot f_s \quad (4)$$

2.2.2 다이오드 손실

다이오드의 손실은 도통 손실과 역 회복 손실이 존재하지만, 본 논문에서 플라이백 컨버터는 DCM으로 동작한다. 따라서 다이오드는 턴 오프 동작 시 역 회복 현상이 발생하지 않기 때문에 도통 손실만 계산하며, 손실은 식 (5)를 통해 계산한다^[2].

$$P_{Diode} = V_F \cdot I_{Davg} \quad (5)$$

2.2.3 변압기 손실

변압기에서 발생하는 손실은 동손과 철손이 있다. 동손은 변압기를 구성하는 코일에서 발생하는 손실이며, 철손은 변압기의 코어에서 발생하는 손실이다. 동손은 식 (7)을 통해 계산하였으며, 철손은 제조사의 데이터 시트를 기반으로 계산한다^[2].

$$P_{Transformer} = P_{copper} + P_{Iron} \quad (6)$$

$$P_{copper} = I_{pri_rms}^2 R_{pri_winding} + I_{sec_rms}^2 R_{sec_winding} \quad (7)$$

2.2.4 인버터 스위치 손실

2-stage 구조에 사용되는 풀 브릿지 인버터의 경우에는 인버터 스위치의 도통, 스위칭 손실을 이용하여 계산하였다. 인버터에서 전체 손실은 식 (8)-(12)를 통해 계산한다^[3].

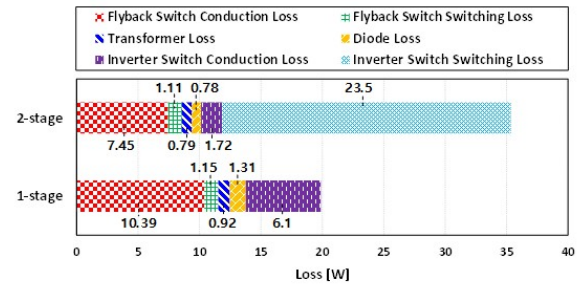


그림 2 PV-MIC AC 모듈 구성 방식에 따른 손실분포
Fig. 2 Loss distribution according to configuration method of AC module PV-MIC.

$$P_{Inverter.loss} = P_{Inverter.cond} + P_{Inverter.sw} \quad (8)$$

$$P_{Inverter.cond} = I_{pri_rms}^2 \cdot R_{ds(on)} \quad (9)$$

$$P_{Inverter.sw} = P_{on} + P_{off} \quad (10)$$

$$P_{on} = (V_{DS} \cdot I_D \cdot \frac{t_r}{2} + Q_{rr} V_{ds}) \cdot f_{sw} \quad (11)$$

$$P_{off} = (V_{DS} \cdot I_D \cdot \frac{t_f}{2}) \cdot f_{sw} \quad (12)$$

2.3 손실 결과 분석

그림 2는 360 [W]급 AC 모듈형 PV-MIC의 구성 방식에 따른 손실을 분석한 그래프이다. 분석 결과 2-stage 구조를 사용하는 경우 플라이백 컨버터의 스위치, 변압기, 다이오드 손실은 더 적게 발생하지만, 풀 브릿지 인버터의 스위칭 손실이 매우 크게 발생하여 전체 손실이 약 15 [W] 증가했다. 이를 통해서 AC 모듈형 PV-MIC의 1-stage 구조가 2-stage 구조에 비해 효율이 우수함을 확인했다.

3. 결론

본 논문에서는 AC 모듈형 PV-MIC의 구성 방식에 따른 전력 손실을 비교 분석하였다. 이를 위해 각 전력 반도체 소자 및 변압기의 손실을 시뮬레이션과 수식을 기반으로 계산하였으며, 결과적으로 플라이백 인버터를 사용한 1-stage AC 모듈형 PV-MIC의 효율이 더 우수함을 확인하였다.

참고 문헌

- [1] Y. H. Ji, "Particle swarm optimization based design point deduction methodology for efficiency-optimized Flyback inverters for PV AC-Module Applications," Ph.D dissertation, Dept. PV Syst. Eng., Sungkyunkwan Univ., Suwon, 2013.
- [2] MPS, Reduction of no-load power consumption, Appl. Note AN052, Rev. 1.0, pp. 6-10, Oct. 2011.
- [3] M. S. Son, H. J. Lim, and Y. H. Cho, "Simulation and analysis of losses of switching device for single grid-connected full bridge inverter," *The Trans. of the Korean Inst. of Power Electron. Lett.*, Vol. 23, No. 4, pp. 294-297, Aug. 2018.