

태양전지 모듈장착형 컨버터 (Module Integrated Converter)와 태양광발전시스템의 구성



최현태
한국과학기술원
인공위성연구소

개 요

대표적 신재생 에너지원으로 빠르게 보급되고 있는 태양광발전(Photovoltaic, PV) 시스템은 다른 신재생에너지보다 초기설치 비용이 높고 에너지 밀도가 낮아 발전단가가 높은 단점이 있다. 따라서 태양광발전시스템의 경제성 확보를 위해 생산 가능한 최대 전력을 효율적으로 공급하는 것을 목표로 시스템 핵심 구성요소인 태양전지 및 전력변환장치의 효율 향상과 시스템 구성 방법 다변화를 통한 효율 개선 위해 다양한 기술들이 연구 개발되고 있다.

태양전지의 경우 웨이퍼 기반 결정질, 화합물 반도체, 유기물 등으로 구분되며 전체 태양전지 셀 생산의 97% 이상을 결정질 실리콘 기술은 오랜 기간 연구를 통해 약 27%의 효율을 달성하였다.

전력변환장치의 효율에 영향을 미치는 요소는 크게 2가지로 나눌 수 있는데, 첫 번째는 최대전력점추종(Maximum Power Point Tracking, MPPT) 알고리즘의 정확도 및 속도이고, 두 번째는 에너지변환 효율이다. 가장 널리 사용되는 MPPT 기법인 P&O(Perturbation and Observation) 방식과 IncCond(Incremental Conductance) 방식 이외에 다양한 알고리즘이 연구 및 적용되고 있고, 그 효율은 99%에 달하고 있다. 또한, 에너지변환 효율은 300W급에서 96%, 1kW 이상급에서는 98% 이상의 정격효율을 기록하고 있다.

태양광 발전시스템의 구성 방법은 태양전지의 연결형태 및 인버터의 접속형태에 따라 중앙집중형 인버터 방식, 스트링 인버터 방식, 멀티스트링 인버터 방식, 마이크로 인버터 방식 등으로 나뉘고, 각 방식의 장·단점을 기반으로 태양광 발전시스템 구성에 적용되고 있다. 최근 마이크로 인버터 방식과 유사한 모듈장착형 컨버터(Module Integrated Converter, MIC)를 활용한 방식이 주목을 받고 있다. 이미 미국 및 유럽 시장에서는 MIC를 활용한 발전시스템의 효율 개선 효과가 입증되어 시장 점유율을 높여가고 있지만, 국내시장에서는 아직은 생소한 시스템 구성 방법이다.

이 글에서는 다양한 종류의 태양광 발전시스템의 구성뿐만 아니라, MIC를 활용한 시스템 구성에 대한 동향을 소개하고자 한다.

태양광 발전시스템

태양광 발전시스템은 요구되는 출력을 얻기 위해 PV 모듈(PV Module)을 직·병렬로 연결하여 PV 스트링(PV String) 또는 PV 어레이(PV Array)를 구성하여 사용한다. PV 모듈은 광전효과를 통해 전기를 생성할 수 있는 기본 단위 소자인 PV 셀(Solar Cell or PV Cell)을 직렬 및 병렬로 연결하고 패키징 한 단위이고, PV 스트링은 출력 전압이 낮은 PV 모듈을 태양광 발전시스템 요구 전압에 맞게 직렬로 연결한 것이고, 이러한 스트링을 병렬로 연결한 것을 PV 어레이라고 한다(그림 1).

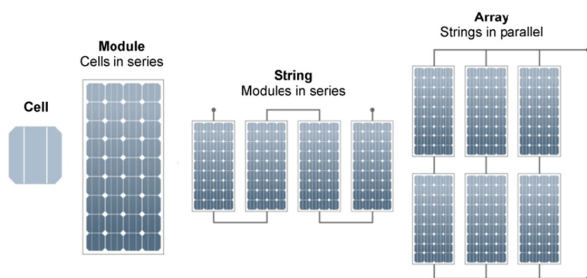


그림 1. 태양전지 셀, 모듈, 스트링, 어레이 구조

PV 어레이나 스트링에서는 필연적으로 모듈 사이의 부정합(Mismatch)이 발생하게 된다. 부정합은 같은 PV 모듈로 태양광 발전시스템을 구성하여도 개별모듈의 전기적 특성 차이로 인해 시스템 전체 출력이 각 모듈 최대출력의 합보다 작아지게 되는 현상이고, 그 차이를 부정합 손실(Mismatch loss)이라고 한다. PV 모듈의 전기적 특성 차이는 제조공정에서 발생하는 편차, 장기간 사용으로 인한 성능 저하, 그림자, 먼지 등과 같은 부분 음영, 모듈 설치 고도 각, 온도 등과 같은 외부 환경 차이로 발생하게 된다. 이러한 부정합은 시스템 발전효율을 악화시키고 PV 모듈의 성능 및 수명을 단축시키는 요인으로 부정합 손실 개선을 위해 다양한 종류의 태양광 발전시스템 구성 방법이 제시되었다.

가장 많이 사용되는 태양광 발전시스템 구성은 스트링 방식과 중앙집중형 방식이고, 부정합 손실을 최소화하는 방법은 마이크로 인버터와 MIC 방식이다. 2018년 약 110GW의 태양전지가 전 세계적으로 설치가 되었고, 이 중 52%가 스트링 인버터 방식을 활용하여 설치되었다. 중앙집중형 방식은 44%를 차지하였고, MIC와 마이크로 인버터가 각각 3%와 1%를 차지하였다(그림 2).

중앙집중형 인버터 구성은 PV 어레이를 하나의 태양광 인버터를 활용하여 계통에 연결하는 방식으로 중·대용량 발전시스템에 적합한 방법이다(그림 3(a)). 시스템 구성에 하나의 인버터만 사용되므로 설비 가격이 저렴하다는 장점이 있다. 그러나 PV 어레이 전체가 하나의 최대출력점(Maximum Power Point, MPP)에 맞춰 동작하게 되어

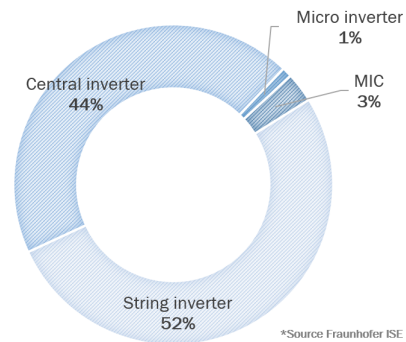


그림 2. 2018년 태양광 발전시스템 설치 방식

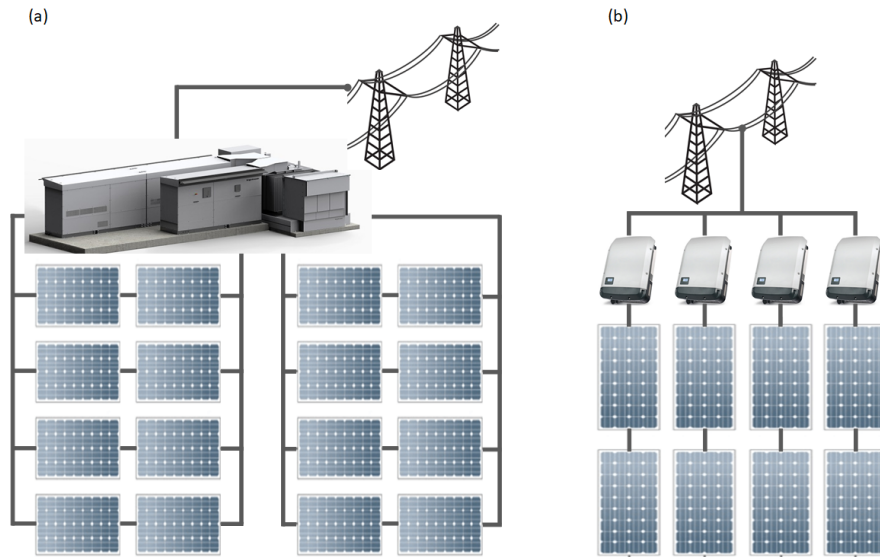


그림 3. 태양광 발전시스템 구성 방식 (a) 중앙집중형 인버터 (b) 스트링 인버터

PV 스트링 사이 또는 PV 모듈 사이에서 발생하는 부정합에 대응할 수 없는 단점이 있고, 역전류방지 다이오드에서의 추가적인 손실도 발생한다.

중앙집중식의 가장 큰 문제점인 부정합 손실을 줄이기 위해 스트링 인버터 방식이 활용되고 있다(그림 3(b)). 가장 널리 사용되는 태양광 발전시스템 구성 방법인 스트링 인버터 방식은 각각의 PV 스트링이 개별 인버터에 접속되어 계통에 연계되는 방식으로 중소형 상업용 혹은 가정용 태양광 발전시스템에서 가장 일반적인 형태이다. PV 스트링별로 독립적인 MPP를 가지고 발전하여 중앙집중형보다 부정합 손실이 상대적으로 낮고, 인버터 고장 발생 시 교체가 용이하여 유지보수가 쉽다. 또한, 시스템 확장 측면에서도 PV 스트링과 인버터만 추가하면 되는 장점이 있다. 그러나 다수의 인버터 설치가 요구되는 만큼 초기설치 비용증가에 따른 단위용량당 발전단가가 중앙집중형 대비 2~3배 정도 높다. AC 계통과 PV 스트링의 분리(Decouple)가 필수적이어서 인버터 수명을 단축시키는 대용량 전해 커패시터나 분리 회로 등의 추가적인 부품이 필요하다.

멀티스트링 인버터는 중앙집중형 방식과 스트링 방식의 장점을 취합한 방식이다(그림 4). 멀티스트링 인버터는 다수의 PV 스트링을 입력으로 받아 2번의 전력변환단계를

(MPPT DC-DC 단계와 DC-AC 변환 단계) 인버터 내부에서 거쳐 계통에 연결된다. 중앙집중형 방식과 같이 하나의 인버터를 활용하여 태양광 발전시스템을 계통에 연결하여 시스템 구조가 비교적 단순하고, 스트링 방식과 같이 MPPT가 스트링별로 이루어져 부정합 손실을 낮출 수 있다. DC-DC 단계에서 PV 스트링을 인버터와 분리하여 DC 버스의 전압변동이 PV 출력에 영향을 주지 않으므로, 스트링 인버터 방식에 비해 작은 전해 커패시터나 필름 커패시터와 같이 신뢰성이 좋은 제품을 적용할 수 있다. 하지

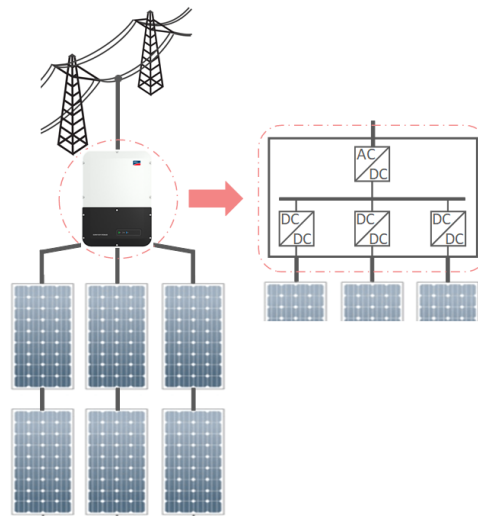


그림 4. 태양광 발전시스템 구성 방식 멀티스트링 인버터

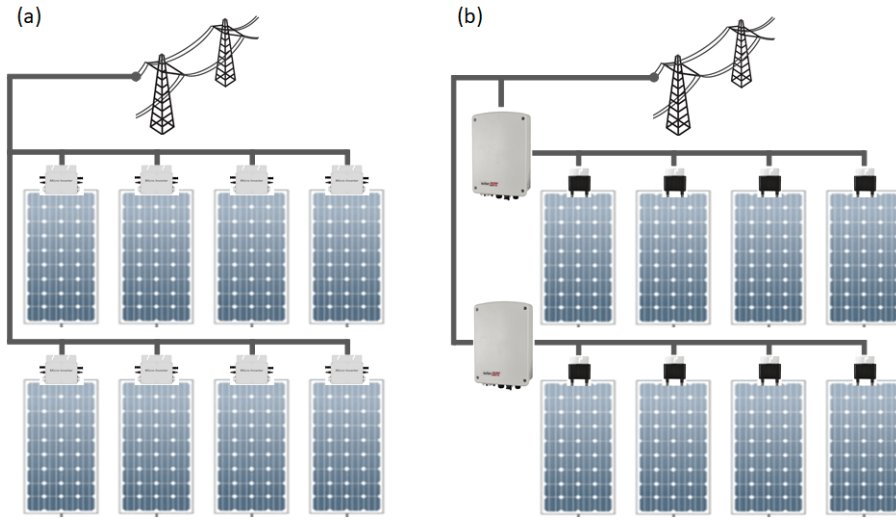


그림 5. 태양광 발전시스템 구성 방식 (a) 마이크로 인버터 (b) MIC

만, 2번의 전력변환단계를 거치므로 에너지변환효율이 다른 구성 방식에 비해 낮고, 하나의 인버터를 사용하므로 시스템 확장이 어려운 단점이 있다.

마이크로 인버터 방식은 PV 모듈 1개에 인버터 1개를 부착하여 시스템을 구성하는 방식으로 스트링 인버터나 멀티스트링 인버터보다 매우 적은 용량의 인버터가 사용된다(그림 5(a)). PV 모듈 뒷면 혹은 패널옆에 설치되므로 인버터가 차지하는 시스템 설치 면적이 거의 없고, DC-AC 변환과 MPPT가 PV 패널별로 이루어지므로 모듈 단위의 부정합 손실이 전혀 발생하지 않는다. 그리고, 각 PV 모듈의 전압·전류를 측정하므로 태양광 발전시스템의 상세 모니터링과 빠른 고장 대처가 가능하다. 그러나 30V 정도 수준의 낮은 PV 모듈 출력 전압을 220V의 계통 전압에 맞게 승압시키기 위해 높은 전압 변환 비율을 가져야 하므로 다른 방식에 비해 인버터의 에너지변환 효율이 상대적으로 낮고, 다수의 전력변환장치를 설치해야 하므로

초기설치 비용이 매우 높은 단점이 있다.

MIC 방식은 스트링 인버터 방식과 마이크로 인버터 방식을 조합한 구성으로 마이크로 인버터 방식과 같이 각각의 PV 모듈에 1개의 MIC가 설치되어 MPPT를 위한 DC-DC 변환을 수행하고, 스트링 인버터 방식과 같이 PV 스트링 단위로 인버터가 설치되어 계통연계를 위한 DC-AC 변환을 수행한다(그림 5(b)). PV 모듈 단위에서 MPPT가 이루어지므로 부정합 손실이 발생하지 않으며, 태양광 발전시스템의 상세 모니터링이 가능하다. 마이크로 인버터와 같이 다수의 전력변환장치 설치가 필수적이지만, 요구되는 전압 변환 비율이 상대적으로 낮은 MIC는 저전압 부품을 활용하여 마이크로 인버터 대비 높은 가격 경쟁력을 가지고 있다. 또한, MIC의 에너지변환 효율은 최대 98.9%로 스트링 인버터와 함께 사용되어 2단계의 전력 변환단계를 거침에도 불구하고 마이크로 인버터보다 효율이 높다.

표 1. 스트링 인버터, 마이크로 인버터, MIC 방식 비교

	스트링 인버터	마이크로 인버터	MIC+스트링 인버터
모듈 단위 부정합 손실	높음	낮음	낮음
에너지변환 효율	최대 99%	최대 96%	최대 98%
설치비용	80~220원/W	360원/W	120원/W
시스템 세부 모니터링	어려움	가능	가능
시스템 확장	다소 어려움	매우 쉬움	다소 어려움

태양전지 모듈장착형 컨버터 (Module Integrated Converter)

전력전자 부품의 비용 감소, 수명 및 신뢰성에 관한 높은 효율성 및 기술적 개선은 태양광 발전시스템에 활용되는 MIC의 발전에 크게 이바지했다. 그러나 MIC가 널리 활용될 수 있었던 주된 이유는 다양한 원인으로부터의 부정합 손실을 극복할 수 있다는 데 있다.

MIC Toplogy

태양광 발전시스템에 MIC를 적용하기에 앞서 최적의 컨버터 토폴로지(Topology) 선정을 위해 다양한 연구가 진행됐다. DC-DC 컨버터의 기초인 벅(Buck), 부스트(Boost), 벅-부스트(Buck-Boost), 축(Cuk) 컨버터 토폴로지를 적용한 MIC의 동작 성능이 분석되었다(그림 6). 벅 컨버터가 전체 출력영역에서 가장 우수한 효율을 나타냈고, 부스트 컨버터가 그 뒤를 이어 약 1% 정도 낮은 효율을 기록하였다. 반전 벅-부스트 컨버터와 축 컨버터는 태양광 발전시스템 MIC 토폴로지로 적용하기에 너무 낮은 효

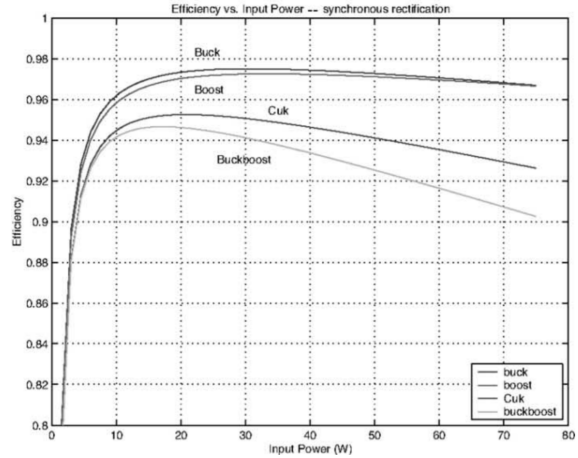


그림 7. MIC 토폴로지 별 효율

율을 나타냈다. 에너지변환효율이 우수한 벅 컨버터와 부스트 컨버터는 각각 강압과 승압만 가능한 전압 변환 특성 때문에 그 적용 범위가 한계가 있는 단점이 있다.

최적의 MIC 토폴로지로 비반전 벅-부스트 컨버터 토폴로지가 제안되었다. 비반전 벅-부스트 컨버터는 승압과 강압 두 가지 모두 동작이 가능하며, 추가로 PV 모듈이 별도의 전력변환 없이 전력을 공급하는 통과 기능도 적용할 수 있는 장점이 있다. 다양한 형태로 전압을 변경할 수 있

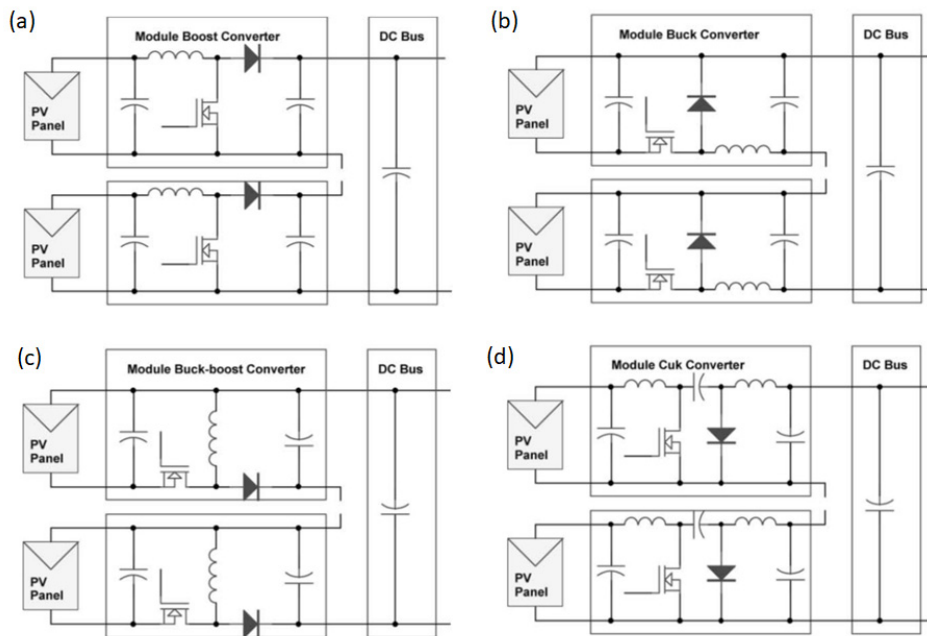
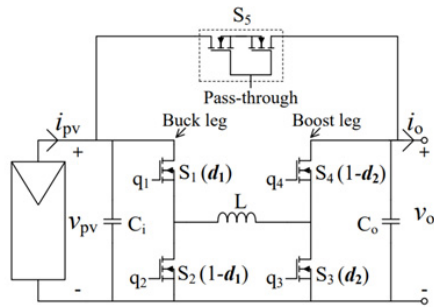
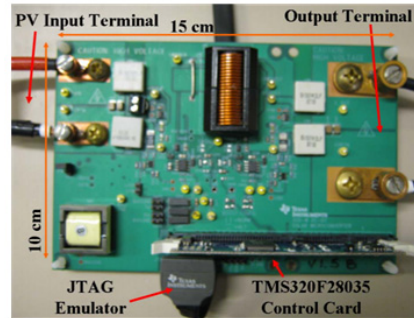


그림 6. MIC 토폴로지 (a) Boost Converter (b) Buck Converter (c) Inverting Buck-Boost Converter (d) Cuk Converter



(a)

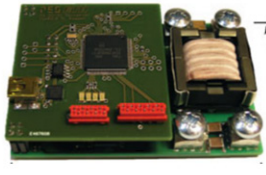


(b)

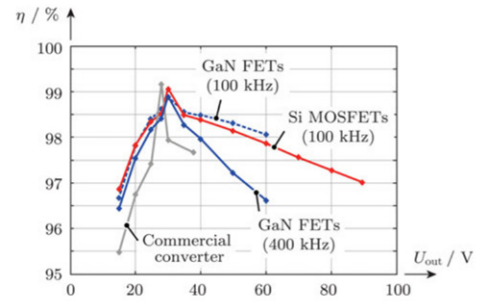
그림 8. (a) 비반전 buck-부스트 컨버터 (b) TI의 MIC 시작품



(a)



(b)



(c)

그림 9. (a) Si buck-부스트 컨버터 (b) GaN buck-부스트 컨버터 (c) 컨버터 효율

는 장점으로 인해 기존의 buck 부스트 컨버터 토폴로지가 가지는 문제를 해결하였고, 반전 buck-부스트 컨버터에서 나타나는 노이즈, 스위칭 스트레스 등의 문제로 인한 효율 저하도 개선되었다. TI에서는 이러한 비반전 buck-부스트 컨버터를 사용하여 200W급의 MIC 시작품을 개발하였고, 전반적인 동작영역에서 96% 이상의 효율을 기록하였다 (그림 8). 비반전 buck-부스트 컨버터 기반 MIC의 에너지 변환 효율을 더욱 높이기 위해 Si(Silicon) 기반의 전력반도체 대신에 GaN(Gallium Nitride) 기반의 전력반도체가 적용되어 최대효율이 99%가 넘는 시작품도 개발되었다 (그림 9).

MIC 구성 방법

MIC를 사용한 태양광 발전시스템 구성은 MIC의 출력단을 연결하는 방식에 의해 직렬형과 병렬형으로 구분된다.

직렬형은 MIC의 출력을 직렬로 연결하는 방법으로 각

MIC 출력 전압의 합이 DC 버스 전압이 되므로($V_{dc_bus} = V_{o1} + V_{o2} + V_{o3}$), 220Vac 계통연계에 필요한 DC 버스 전압을 쉽게 만들 수 있다(그림 10). 그 결과, 요구되는 컨버터의 전압변환 비율이 높지 않기 때문에 에너지변환 효율이 좋은 영역에서 컨버터를 동작시킬 수 있다. 그러나 PV 모듈 간의 부정합 발생 시, 직렬연결의 특성상 전체 MIC의 출력 전류가 같아야 한다는 점에서 문제가 발생한다. 그림 10의 PV₁, PV₂, PV₃에 부분 음영이나, 일사량 부조화 등의 현상이 없다면 각 PV 모듈의 MPP가 같다면 MIC 컨버터의 출력 전류는 I_o로 같겠지만, 부분 음영 등과 같은 현상으로 인해 I_{rr1}과 I_{rr2}가 차이가 난다면 PV₁과 PV₂의 MPP가 달라지고, MIC 출력 전류도 영향을 받는다. 이로 인해 MIC의 출력 전압이 심하게 변동하게 되고 부정합이 심해지면 MIC 출력 전압이 0V에 가까워지거나, 정격전압 이상으로 커질 수도 있다. 이와 같은 위험 상황 방지를 위해 부정합이 심한 상황에서는 MIC 단위 MPPT 수행을 멈추고 컨버터가 안전모드로 동작할 필요가 있다.

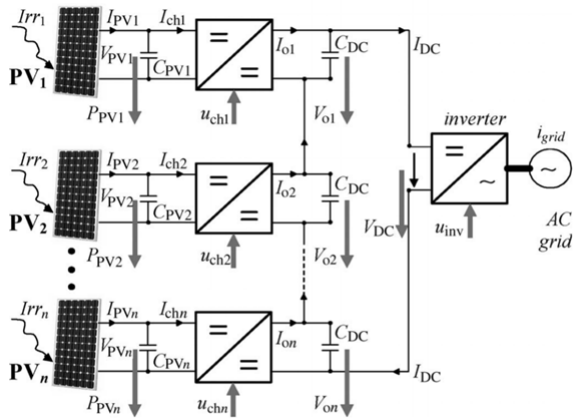


그림 10. 직렬형 MIC 구성

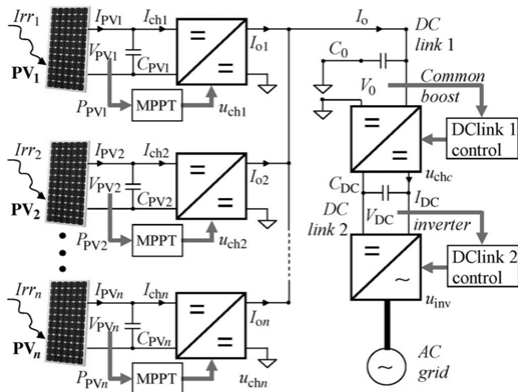


그림 11. 병렬형 MIC 구성

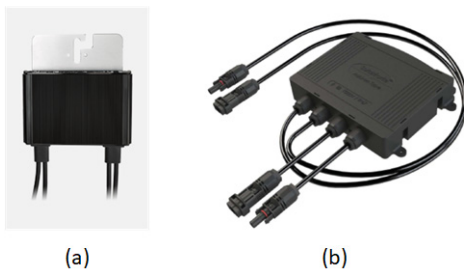


그림 12. MIC (a) Solarege의 Power Optimizer (b) RTS Energy의 SolarForte

병렬형은 MIC의 출력을 병렬로 연결하는 구조로, MIC 마다 독립적인 출력 전류를 가질 수 있어 직렬형에서 문제가 되었던 부정합 발생에 따른 위험은 존재하지 않는다. 그러나, DC 버스의 전압이 각 MIC 출력 전압과 같으므로 ($V_{DC_bus} = V_{o1} = V_{o2} = V_{o3}$), 계통연계 요구되는 DC 버스

전압을 만들기 위해서는 효율이 낮은 고승압 영역에서 컨버터가 동작하거나, 추가적인 DC-DC 전력변환단계를 설치하여야 한다.

현재 시장 점유율이 가장 높은 MIC 제품은 이스라엘 Solarege의 Power Optimizer 제품으로 2010년 MIC 제품을 상용화한 후 전 세계적으로 약 12GW 시스템을 설치하였고, 국내에는 2017년에 출시되었다. 국내기업인 알티에스에너지는 2015년 산업부인증 신기술로 선정된 SolarForte 제품을 판매 중이다.


맺음말

태양광 발전시스템은 PV 모듈의 양산과정, 사용 기간, 부분 음영 등 다양한 원인에 의한 부정합 손실 저감을 위해 중앙집중형 방식부터 스트링 인버터, 멀티스트링 인버터, 마이크로 인버터, MIC 방식까지 다양한 시스템 구성 방식이 개발되었다. 스트링 인버터 방식과 중앙집중형 방식을 적용한 태양광 발전시스템이 전체의 90% 이상을 차지하고 있지만, 모듈 단위 MPPT를 통한 부정합 손실 문제 해결뿐만 아니라, 발전시스템 상세 모니터링 기능 및 다양한 안전기능을 수행할 수 있는 MIC 방식에 관한 관심이 국내에서 지속해서 증가하고 있다.

태양광 발전시스템에서 MIC 방식의 적용은 초기 설치 비용이 가장 큰 단점이지만, 꾸준한 연구개발을 통한 부품 비용 감소, 수명 및 신뢰성 개선을 통해 가격경쟁력을 확보하고 있다. 부정합 손실 문제를 효율적으로 해결할 수 있는 MIC의 지속적인 국내성장이 기대된다.

참고문헌

[1] G. R. Walker and P. C. Sernia, "Cascaded DC-DC converter connection of photovoltaic modules," in IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 19, no. 4, pp. 1130-1139, July 2004.

- 
- [2] M. Adly and K. Strunz, "Irradiance-Adaptive PV Module Integrated Converter for High Efficiency and Power Quality in Standalone and DC Microgrid Applications," in IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 65, no. 1, pp. 436-446, Jan. 2018.
- [3] 조경호, "태양광 발전용 마이크로컨버터 기술", 전력전자 학회지 제20권 제3호, pp39-43, June, 2013
- [4] S. Philipps, "Photovoltaic Report", Fraunhofer ISE and Werner Warmuth, PSE Conferences & Consulting GmbH, Mar. 2019
- [5] R. K. Hester, C. Thornton, S. Dhople, Z. Zhao, N. Sridhar and D. Freeman, "High efficiency wide load range buck/boost/bridge photovoltaic microconverter," 2011 Twenty-Sixth Annual IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition(APEC), Fort Worth, TX, 2011, pp. 309-313.
- [6] M. Kasper, D. Bortis and J. W. Kolar, "Classification and Comparative Evaluation of PV Panel-Integrated DC-DC Converter Concepts," in IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 29, no. 5, pp. 2511-2526, May 2014.
- [7] Solaredge, "Power optimizer", <https://www.solaredge.com>
- [8] RTS Energy, "SolarForte", <http://www.rts-energy.com>