



태양광 모듈 시스템의 에너지 변환을 위한 전력 반도체에 관한 리뷰

박형기¹ ID, 김도영², 이준신³

¹ 아주대학교 AI-초융합 KIURI 질환극복 중개연구단

² 울산과학기술대학교 전기전자공학부

³ 성균관대학교 전자전기컴퓨터공학과

A Brief Review of Power Semiconductors for Energy Conversion in Photovoltaic Module Systems

Hyeong Gi Park¹, Do Young Kim², and Junsin Yi³

¹ AI-Superconvergence KIURI Translational Research Center, Ajou University, Suwon 16499, Korea

² School of Electrical and Electronic Engineering, Ulsan College, Ulsan 44022, Korea

³ College of Information and Communication Engineering, Sungkyunkwan University, Suwon 16419, Korea

(Received January 3, 2024; Revised January 11, 2024; Accepted January 12, 2024)

Abstract: This study offers a comprehensive evaluation of the role and impact of advanced power semiconductors in solar module systems. Focusing on silicon carbide (SiC) and gallium nitride (GaN) materials, it highlights their superiority over traditional silicon in enhancing system efficiency and reliability. The research underscores the growing industry demand for high-performance semiconductors, driven by global sustainable energy goals. This shift is crucial for overcoming the limitations of conventional solar technology, paving the way for more efficient, economically viable, and environmentally sustainable solar energy solutions. The findings suggest significant potential for these advanced materials in shaping the future of solar power technology.

Keywords: Power semiconductor device, PV panel, MOSFET, IGBT, Bipolar transistor

1. 서론

전 세계적으로 증가하는 에너지 수요와 기후 변화에 대응하기 위한 글로벌 이니셔티브는 지속 가능한 에너지원으로서의 전환을 필수적인 목표로 삼고 있다 [1]. 이러한 배경하에 재생 가능한 에너지원, 특히 태양광 에너지의 중요

성이 급부상하고 있다 [2]. 태양광 에너지는 무한한 자원에서 발생하며, 온실 가스 배출이 거의 없는 깨끗한 에너지원으로 지속 가능한 미래를 향해 반드시 필요한 것이다. 태양광 에너지는 재생 가능한 에너지원 중에서 특별한 위치를 차지하는데 이는 지구상에서 가장 풍부하고 접근 가능한 에너지원 중에 하나로 환경적, 경제적 이점이 매우 크다. 태양광 에너지의 활용은 지난 몇 년간 크게 증가하였으며, 이는 기술적 진보와 함께 에너지 산업에서 중요한 변화를 반영한다. 그림 1에서 알 수 있듯이 2050년이 되면 화석 에너지 연료의 고갈에 따른 대응 차원에서 신재생에너지인 태양광 에너지를 이용한 전력증가 수요가 크게 증가할 것

✉ Hyeong Gi Park; hgpark007@ajou.ac.kr

Copyright ©2024 KIEEME. All rights reserved.
This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

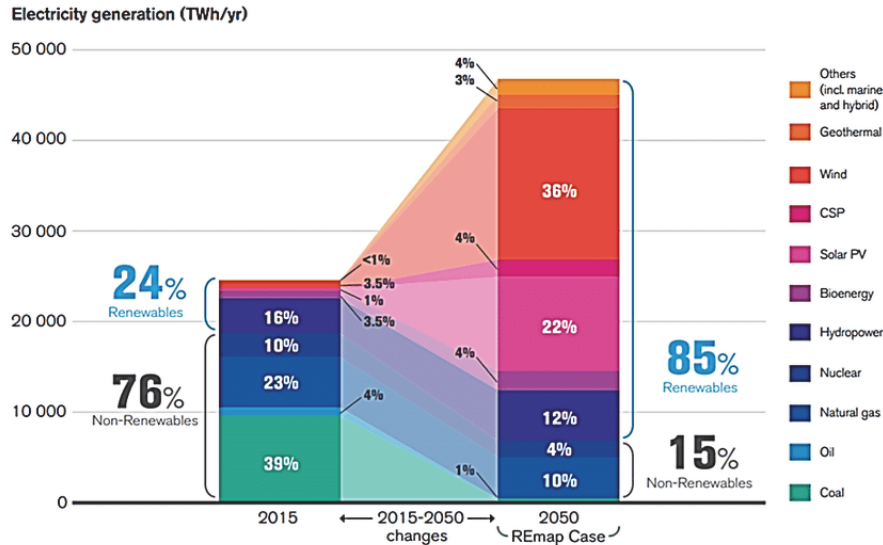


Fig. 1. The depletion of fossil energy sources due to the increase in global energy demand and the future trends in electricity generation from renewable energy sources [3].

으로 보고 있다 [3].

이처럼 폭발적인 수요 증가로 인해 늘어나게 될 태양광 모듈 발전 시스템에서 전력 반도체는 에너지 변환, 효율성 및 안정성을 보장하는 핵심으로 태양광 패널로부터 생성된 에너지를 효과적으로 관리하고 사용할 수 있도록 하며 전력 반도체는 높은 효율성과 함께 안정적인 에너지 공급을 가능하게 하여 태양광 시스템의 전반적인 성능을 향상시킨다 [4].

전력 반도체 기술은 태양광 모듈 장치에 있어 핵심적인 부분으로 태양광 패널로부터 생성된 직류(DC) 전력을 가정이나 사업체에서 사용할 수 있는 교류(AC) 전력으로 변환하는 인버터에서 이 기술은 필수적이다. 전력 반도체는 높은 에너지 변환 효율과 더불어 시스템의 안정성을 보장하는 역할을 하며, 이는 태양광 시스템의 전반적인 성능과 신뢰성에 결정적인 영향을 미친다 [5].

이 분야의 연구는 지속적인 발전과 혁신이 필요한데 이번 논문에서 태양광 모듈 시스템 장치에서의 전력 반도체 기술의 현재 상태와 발전 가능성을 탐구하고자 한다. 전력 반도체는 태양광 시스템의 효율성과 경제성을 향상시키는 데 중요한 역할을 하며, 이 분야에서의 혁신은 에너지 전환의 효율성을 극대화하고 광범위한 활용을 가능하게 한다. 이번 리뷰는 전력 반도체 기술의 최신 동향을 분석하고, 향후 발전 가능성을 탐색함으로써 지속 가능한 에너지 시스템으로의 전환에 중요한 기여를 하려는 것이다. 이번 논문에서의 구성은 전력 변환과 소재 및 전력 반도체의 종류,

태양광 모듈 시스템 장치에서 전력 반도체 활용 사례와 향후 전망 및 결론으로 구성되어 있으며 각 장에서 전력 반도체의 기술적 측면, 시장 동향, 최신 기술, 그리고 실제 사례 연구를 포함하여 전력 반도체 기술과 그 중요성에 대한 포괄적인 이해를 제공하는 데 목적이 있다.

2. 태양광 모듈 시스템 내 전력 반도체의 기술적 측면

태양광 모듈로부터 발생한 직류 전력은 고도의 효율성과 정확성을 요구하는 인버터를 통해 교류 전력으로 변환된다. 이러한 과정은 고성능 전력 반도체 기술에 의존하며, 전력 손실 최소화와 전력 품질 최대화를 목표로 한다 [6]. 전력 반도체 기술의 발전, 특히 wide bandgap (WBG) 소재의 활용은 인버터의 효율성과 신뢰성을 혁신적으로 향상시켰다. SiC, GaN와 같은 WBG 소재는 높은 전기적 내구성과 열적 안정성을 제공하며, 이는 고전압 및 고온 환경에서도 뛰어난 성능을 가능하게 한다 [6-8]. 그러면 이러한 전력 반도체의 설계는 인버터의 전체적인 성능을 결정짓는 핵심 요소로 이들은 스위칭 속도, 전압 및 전류 용량, 그리고 전력 손실 관리를 최적화하기 위해 정밀하게 설계되어야 한다 [9]. 고급 모델링 및 시뮬레이션 기술을 사용하여 전력 반도체의 동작 매개변수를 미세하게 조정함으로써 고효율 및 고신뢰성 인버터 설계가 가능해진다 [10]. 그러나 무엇보다 중요한 것은 효율성으로 에너지 변환 과

정에서 발생하는 손실을 최소화하는 데 중요하며 이는 높은 스위칭 효율, 낮은 전도 손실, 그리고 감소된 열 발생을 통해 달성된다. 전력 반도체의 효율성 향상 역시 시스템 전체의 에너지 손실을 줄이고 태양광 시스템의 전체적인 에너지 저장량을 증가시킨다 [11]. 이와 더불어 전력 반도체는 지속적인 고온, 고전압 및 스위칭 스트레스에 견딜 수 있는 높은 내구성이 요구되며 이러한 내구성은 장기적으로 시스템의 안정성과 효율성을 보장한다 [5]. 발열 역시 성능과 수명에 직접적인 영향을 미치는 데 효과적인 열 관리 기술로 발열을 최소화하고 반도체의 온도를 최적 범위 내에서 유지하는 데 중요한다 예를 들어 미세 채널 냉각 시스템, 고성능 열 인터페이스 재료, 혁신적인 히트 싱크 디자인은 전력 반도체의 성능과 신뢰성을 높이는 것이 중요하다 [5].

3. 전력 변환과 소재 및 주요 전력 반도체 종류

현대 태양광 모듈 시스템에서의 핵심 구성 요소 중에 하나인 전력 반도체는 에너지 변환의 효율성과 안정성을 결정짓는 중요한 역할을 한다. 이번 절에서는 전력 반도체와 관련한 전력 변환의 용어 이해를 돕고자 4가지 종류의 전력 변환의 형태(AC→DC, DC→AC, DC→DC, AC→AC), 전력 반도체 소재와 주요 전력 반도체에 대해 소개한다. 전력 반도체에 대해 알아보기에 앞서 전력 변환이란 용어와 하위 개념에 대해 알아야 한다. 직류는 direct current (DC)라 불리는데 시간에 대하여 크기와 방향이 변하지 않고 일정한 전류를 의미하며, 크기와 방향이 주기적으로 변하는 것이 교류 alternating current (AC)로 구분한다 [12]. 발전소에서 생산된 전기는 변전소를 거쳐 가정으로 보급되기까지의 전원은 AC이지만 일반적인 가정에서 AC로 사용할 수 없는 경우도 많아 AC를 DC로 변환해 전원을 공급하기도 한다. 또한 가정에서 소형가전을 사용할 때 5~24 V의 작은 전압으로 변환하여 사용해야 하는 경우도 있다. 이를 위해서는 이처럼 DC와 AC를 변환하여 사용하는데 이와 관련하여 4가지 경우에 대해 생각할 수 있다.

DC-DC 변환은 전압의 크기를 변환하는 데 목적이 있으며 자동차의 배터리로 헤드라이트 LED를 켜는 경우가 그에 해당한다 [13]. AC-DC 변환은 순변환이라 하며 컨버터(converter)로 불리는데 소위 말해 정류작용을 의미하며, DC 전압을 필요로 하는 회로에서의 경우인데, 흔히 가정에서 사용하는 벽전원에서 출력되는 전압을 DC 전압으로 변환할 때를 말하며 모터처럼 AC 전압이 요구되는 회로에서 변환된 DC 전압을 다시 AC 전압으로 역변환할 때 DC-

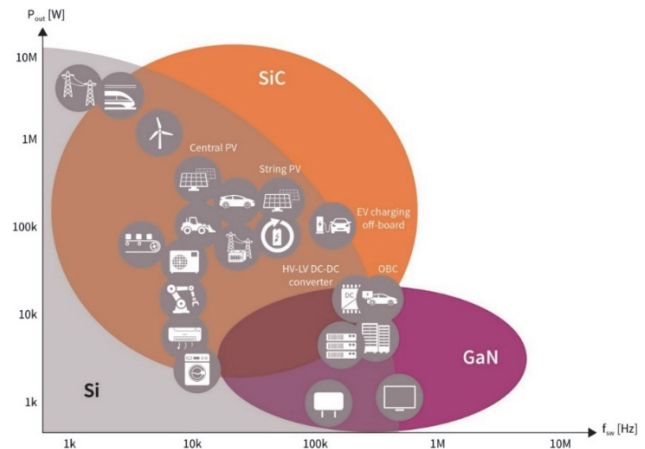


Fig. 2. Various device applications as a function of different power semiconductor materials [7].

AC 변환으로 이러한 작업을 흔히 인버터(inverter)라고 부르며 그 의미를 이해할 수 있다. 마지막으로 AC 전압의 크기 외에도 주파수 변화가 필요할 때 변환하여 사용하는 경우를 AC-AC 변환이라고 부른다 [14-16].

전력 반도체(power semiconductor)는 단순히 전력 변환 외에도 전압 변환(승압 및 강압), 전력 안정, 전력 분배 및 제어 기능 등을 수행하는 데 사용되는 반도체로 전력 전달 및 제어 과정에서 에너지 효율을 향상시키고 전압의 변화를 제어하여 시스템 안정성, 신뢰성을 제공하는 기능을 수행하며, 세탁기, 냉장고, 청소기, 엘리베이터부터 에스컬레이터에 이르는 산업기계를 아우르는 대부분에 사용되고 있으며(그림 2) 고내압화, 대전류화 및 고주파수화된 것이 특징이다. 전력 반도체는 정류 다이오드(rectifier diode), 트랜지스터(transistor), 사이리스터(thyristor), 접합형 트랜지스터(bipolar transistor, BJT), 절연 게이트 바이폴라 트랜지스터(insulated gate bipolar transistor, IGBT), 금속산화막반도체 전계효과 트랜지스터(metal oxide semiconductor field effect transistor, MOSFET) 등이 있다 [6].

우선 표 1은 전력 반도체에서 사용하는 주요 기판재료에 대해 물리적 성질을 비교한 것이다 [8]. 전력 반도체에서 가장 많이 사용되는 것이 실리콘 기판으로 MOSFET, IGBT의 트랜지스터에 주로 사용하고 있다. 그런데 전력 반도체 소자는 고속으로 스위칭 하면서 큰 전력용량이 요구되고 있는데 on 저항의 저감과 내압 향상이 중요하다. 그러나 전력 반도체에서 발생할 수 있는 문제로 발열 문제를 들 수 있는데 실리콘이 가진 재료적 한계에 부딪혀 전력 반도체 재료로서 주목받고 있는 것이 실리콘 카바이드(SiC)이며, 그 다음으로는 질화갈륨(GaN)이다. 이들 재료가 주

Table 1. Comparison of physical properties of power semiconductor materials [8].

Properties	Si	SiC	GaAs	GaN
Crystal structure	Diamond	Hexagonal	Zincblende	Hexagonal
Energy gap (eV), E_G	1.12	3.26	1.43	3.5
Electron mobility (cm^2/Vs), μ_n	1,400	900	8,500	1,250
Hole mobility (cm^2/Vs), μ_p	600	100	400	200
Breakdown field (V/cm) $\times 10^6$, E_B	0.3	3	0.4	3
Thermal conductivity ($\text{W/cm}^2\text{C}$)	1.5	4.9	0.5	1.3
Saturation drift velocity (cm/s) $\times 10^6$, v_s	1	2.7	2	2.7
Relative dielectric constant, ϵ_s	11.8	9.7	12.8	9.5
p, n control	○	○	○	△
Thermal oxide	○	○	×	×

목받게 된 것은 밴드갭 3 eV 이상의 광대역 폭 소재로, 밴드갭이 클수록 내압 또한 커지기 때문에 내압 정도에 차이가 있지만 600 V 이상의 경우에는 SiC를 사용할 것으로 예상할 수 있다. 그렇다고 해서 실리콘 재료가 전력 반도체 소자에 사라지는 것이 아니라는 점이다. 이는 실리콘으로 충분히 제작 가능하기 때문에 많은 업체에서 사용하고 있으며 고성능의 전력 반도체를 목표로 한다면 앞서 언급한 SiC나 GaN로 대체해 나아가고 있다는 점이다.

전력 반도체에 대해 알아보기에 앞서 반도체는 절연체와 전도체의 중간에 존재하는 물질로 이러한 반도체에 전류를 흐르게 하거나 차단할 수 있는 스위칭(switching) 작용을 나타내는데 온(on)과 오프(off)를 번갈아 고속으로 반

복하는 것이다. 그럼 전기를 흐르게 하려면 추진력에 해당하는 전압 인가가 필요하며 도체 물질도 마찬가지로 전압이 인가되지 않으면 전류가 흐르지 않는다. 앞서 전력 반도체 MOSFET와 IGBT의 역할은 전력 변환이다 [17]. 21세기를 사는 우리에게 에너지는 매우 중요한 요소로 없어서는 안 될 존재이다. 일반적으로 전기를 공급하는 데 있어 송전할 경우에 교류가 사용되는데 송전효율이 좋기 때문이다. 하지만 필요에 따라 교류를 직류로 변환 혹은 그 반대의 경우로 하기도 한다. 전력 반도체 MOSFET 및 IGBT와 함께 과거에 주로 바이폴라 트랜지스터와 비교를 통해 간단히 알아보려고 한다 [18].

그림 3은 바이폴라 트랜지스터, MOSFET 및 IGBT의 구

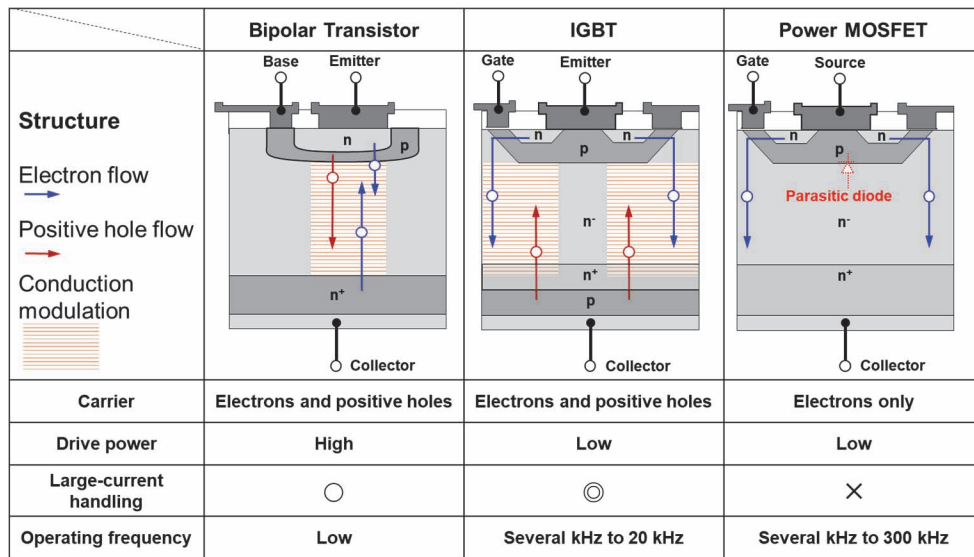


Fig. 3. Comparison of basic structures of major power semiconductor (bipolar transistor, IGBT, power MOSFET) devices [19].

조를 비교한 것이다 [19]. IGBT는 주로 고속 및 저포화 전압 특성을 바탕으로 응용분야가 빠르게 확대되고 있다. 특히 태양광 발전 시스템용 인버터 및 무정전 전원 공급 장치, 디스플레이 패널의 조명 제어, 인덕션 히터의 히터 제어, 역률 보정 회로와 더불어 에어컨의 인버터, 카메라의 플래시를 제어하는 데 적용되고 있다. IGBT는 MOSFET의 고속 스위칭 및 전압 구조 특성과 낮은 on 저항(낮은 포화 전압)을 결합한 전력 트랜지스터의 종류인데 IGBT의 기본 구조는 MOSFET의 drain (collector) 측에 p⁺층을 더해 추가적으로 pn 접합이 형성된다. 그러면 ON 상태에서는 p⁺층에서 n⁻층으로 정공을 주입할 때 정공이 발생하는 전도 변조에 의해 n⁻층의 저항이 급격히 감소한다 [19]. 이를 통해 IGBT는 MOSFET보다 더 큰 전류(낮은 on 저항으로 인해)를 처리할 수 있으므로 전도 손실이 감소하고(발열 감소) 칩 크기가 더 작아진다. 그러나 이러한 IGBT 구조는 스위칭 동작 중에 turn off 시에 수집된 소수 캐리어인 정공의 유출 경로가 차단되어 turn off 지연 및 tail 전류 현상이 발생하는데 이는 MOSFET에 비해 turn off 손실이 증가하고 스위칭 속도가 감소한다.

바이폴라 트랜지스터는 고내압 상태에서 on 저항이 낮은 장점과 동작 매커니즘에서 알 수 있듯이 전자와 정공이 함께 이동하고 정공이 n⁻층에 유입됨에 따라 저항이 저감되는 전도도 변조 효과에 의해 전압 강하가 억제되는 특성이 있는데 결국에는 전류 증폭 동작을 하기 때문에 인가된 전류보다 큰 전류를 흘릴 수 있다. 그러나 입력 임피던스가 낮아 제어에 필요한 소비 전력이 크고 양극성 캐리어를 사용하기 때문에 스위칭 속도가 늦다는 단점이 있다. MOSFET은 전압 구동으로 입력 임피던스가 높기 때문에 제어에 필요한 소비전력이 적고, 캐리어가 전자나 정공 중

한쪽의 유니폴라 트랜지스터이므로 스위칭 속도가 빠른 장점은 있으나 전도도 변조 효과를 사용할 수 없어 고내압이 되면 on 저항이 높아지는 단점도 있다.

위 세 가지 전력 반도체 구조에 대해 비교해 보았다. 각 구조별로 장단점이 있는데, 이들 중에서 IGBT의 장점은 고내압에서 저손실, 비교적 고속이라는 장점이 있다. 그러나 각각의 특징점을 살려 용도에 맞게 구분하여 사용할 필요가 있을 것으로 보인다.

4. 태양광 모듈 시스템 내 전력 반도체 활용

이번 절에서는 태양광 모듈 시스템에서 전력 반도체의 활용을 통해 성능 향상 및 비용 절감과 내용을 바탕으로 논의하고자 한다. 태양광 에너지가 비록 작을지라도 매우 중요하기 때문에 태양광 모듈의 직류 출력 전원부터 교류 그리드 공급에 이르기까지 모든 과정에서 에너지 손실을 최소화하는 것이 필수적이고 이때 대규모의 태양광 모듈 시설에서 분산된 직류 전원을 한 곳으로 집적화하여 이를 발전회사로 오히려 역으로 공급하기 위해서는 인버터가 매우 중요한 역할을 한다(그림 4). 이처럼 태양광 모듈 시스템의 인버터는 가정용처럼 태양광 패널 내의 통합 인버터/최대출력점 추적장치를 통해 활용하거나 상업용처럼 인버터와 모듈의 비율을 1:1로 제공하여 직렬로 연결된 스트링(string) 인버터, 대규모의 유틸리티 인버터는 태양광 모듈 세트에 따른 1개의 인버터가 제공되는 경우도 있다 [20]. 결국 지속적으로 재생 가능한 에너지인 태양광에 의해 전기를 생산하는 데 있어 실리콘이 중요한 역할을 했고 그 외에도 SiC 및 GaN 소재 또한 MOSFET, IGBT 및 다이오

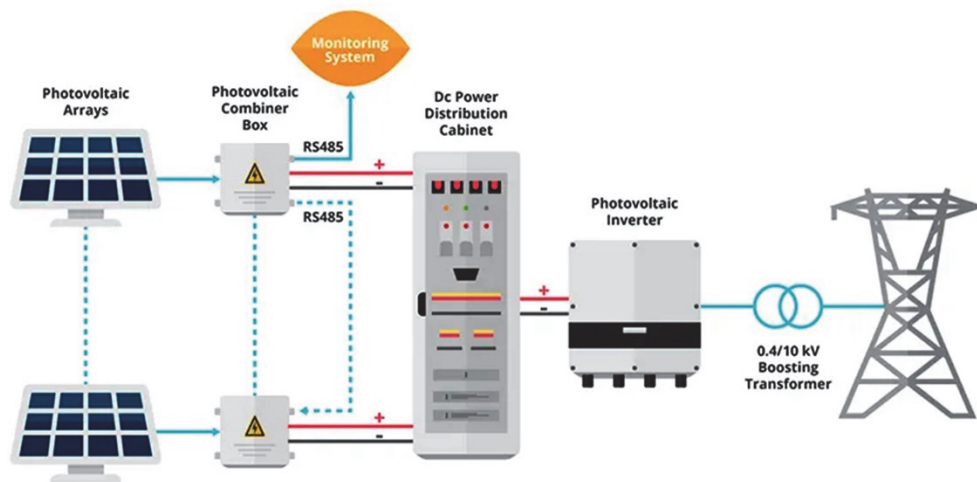


Fig. 4. A main function of multi-MW grid-connected PV module system [21].

드가 대규모 태양광 발전 시설의 인버터 내에서 사용되는 데 우선 IGBT는 고전압 및 고전류에 적용되는 데 가장 일반적으로 사용되고 있다. 이들은 효율적인 스위칭과 우수한 전류 수송을 제공하며 MOSFET은 주로 저전압, 고주파 수 쪽에 적용하는데 인버터 내에서 보조 스위칭 장치로 사용하고 있다 [22]. 그리고 다이오드는 전류가 한 방향으로만 흐르도록 하는데 이는 인버터 내에서 전류를 제어하고 전압 스파이크를 줄이는 데 중요한 역할을 한다. 태양광 모듈에서 인버터 내에 전력 반도체 활용은 앞으로 닥치게 될 신재생에너지 수요 증가의 예상으로 현재의 인버터 기술로는 한계가 있다. 실리콘 소재로 태양광 모듈 시스템의 인버터 성능을 구현하는 데 있어 효율 저하 초래와 전원 공급 용량을 감소로 이어져 그 해결책으로 나온 것이 SiC와 GaN 소재인데 스위칭 손실이 적어 누설 전류가 낮기 때문에 변환효율을 높여주어 에너지를 절감하는데 이점이 있다.

5. 전력 반도체의 시장 규모 및 향후 시장 전망

2022년 기준 글로벌 반도체 시장 규모는 약 780조 원으로 이 중 메모리를 제외한 비메모리 분야의 비중은 76.12%로 하나의 시장을 형성하는 것을 의미한다 [23]. 2030년에는 49조 원이라는 예측과 함께 성장이 기대되는 분야로 전 세계적으로 넷제로(NetZero) 정책 추진에 따른 전력 반도체의 사용 증가를 예상하고 있다 [24]. 앞선 내용에서 실리콘을 대체하는 SiC, GaN의 wide bandgap 반도체 소재 기반의 고성능 전력 반도체는 2025년부터 폭발적인 수요와 함께 시장 점유율 또한 성장할 것으로 기대하고 있다

[25]. 이러한 성장의 원인으로 전력전자 계통의 모듈 수요 증가 및 태양광을 이용한 에너지 발전의 증가와 같은 다양한 요인에 의한 것으로 보고 있다. 전력 반도체 시장에서 ON Semiconductor, Infineon Technologies, ROHM, STMicroelectronics, Texas Instruments 등과 같은 여러 글로벌 기업들이 포함되어 있는데 특히 일본은 전문 제조업체가 즐비하며 대표적으로 Toshiba, Hitachi, Mitsubishi, Renesas Electronics Corporation, Fuji Electric, Shidengen, Sanken Electric, ROHM, Kyocera 등이 있다 [26]. 우리가 뉴스를 통해 익히 들어온 Intel, Samsung Electronics, SK Hynix, Micron 및 Qualcomm 등의 반도체 메이커 회사들과 비교하면 이들 회사는 전력 반도체 분야에서 제품 점유율이 절반을 차지하고 있으며 그중에서 IGBT의 생산 점유율은 Mitsubishi Electric, Fuji Electric, Toshiba 3사가 차지하는 비율이 세계 점유율의 20% 정도이다 [27]. 일본의 전력 반도체 전문 제조업체가 살아남은 원인은 다양하지만 웨이퍼 기판의 8인치 크기의 소형화, 미세화를 위한 고액 투자 필요성이 적으며, 다양한 사양으로 인해 소량 다품종 대응인 것으로 분석되고 있다 [26]. 또한 고객 수요형 대응 역시 중요하기 때문에 아직까지 일본의 다수 업체가 살아남은 것으로 보고 있다. 앞으로 아시아 태평양 지역이 전력 반도체 시장을 지배할 것으로 예상하는데 이들 지역의 강력한 반도체 산업, 특히 중국, 일본, 대만 및 대한민국과 같은 국가들의 지원과 정부 정책 및 이니셔티브가 시장 성장을 뒷받침하고 있고 특히 전기 자동차 부문은 전력 반도체 시장 성장에 상당한 기여를 할 것으로 예측되고 있으며, 전반적으로 전력 반도체 시장은 향후 몇 년 동안 기술 발전, 최종 사용자로부터

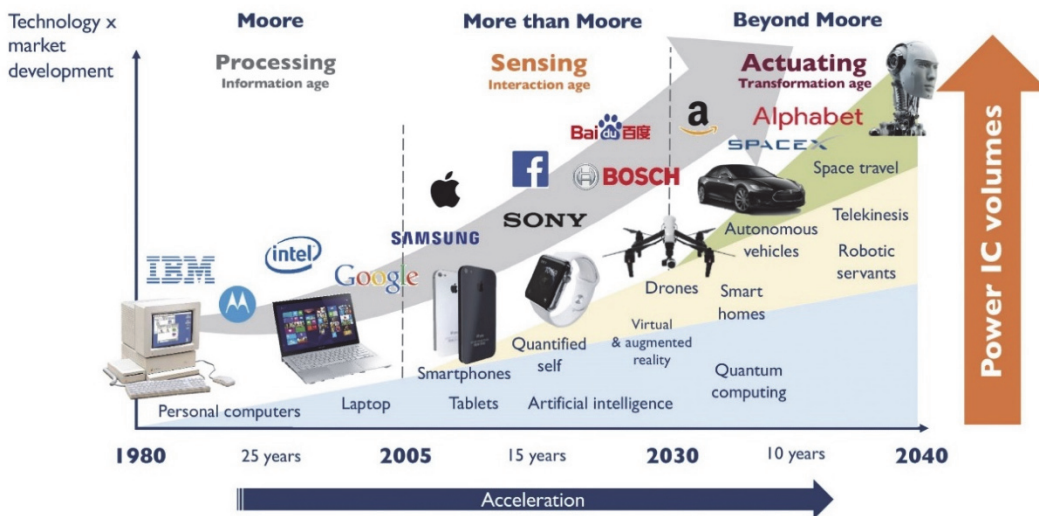


Fig. 5. Technology roadmap of power IC volumes [28].

의 수요 증가 및 키플레이어들 간의 전략적 협력 및 파트너십에 의해 상당한 성장이 예상된다. 앞으로 기술발전 속도에 따라 각 분야별로 다양하고 여러 유형의 정교한 형태로 적용될 것이며 그로 인해 전력 반도체 수가 더욱 많아질 것으로 예상된다 [28].

6. 결론

이번 논문에서는 태양광 모듈 시스템에서 전력 반도체에 관해 리뷰하였다. SiC, GaN와 같은 다양한 전력 반도체 소재의 기술적 진보가 태양광 모듈 시스템의 효율성과 신뢰성 향상에 중요한 역할을 하는 것이며, 전통적인 실리콘 기반 시스템에 대한 도전을 해결하며, 에너지 효율성뿐만 아니라 경제적인 가치 또한 제시한다. 그리고 지속 가능한 에너지 솔루션을 향한 글로벌 이니셔티브에 의해 태양광 산업에서 고성능 전력 반도체에 대한 수요가 더욱 증가할 것으로 지적하였다. 향후에 태양광 기술의 발전을 위한 방향을 제시할 것이며 더 효율적이고 친환경적인 에너지 환경을 보장하며 이에 기여할 것으로 기대된다.

ORCID

Hyeong Gi Park

<https://orcid.org/0000-0002-9590-1623>

감사의 글

이 논문은 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단 혁신성장 선도 고급연구인재 육성사업의 지원을 받아 수행된 연구입니다(No.NRF2021M3H1A104892211).

REFERENCES

- [1] I. Kim, *Trends in the Spread of Climate Change Response Initiatives in the Global Corporate Financial Sector*, KIER CT BRIEF **48**, 1 (2023).
<https://www.kier.re.kr/UploadFiles/tpp/energy/16823005208560.pdf>
- [2] M. E. Mackay, *Solar Energy: An Introduction* (Oxford U. Press, UK, 2015) p. 1.
doi: <https://doi.org/10.1093/acprof:oso/9780199652105.003.0001>
- [3] L. Y. Kai, S. Sarip, H. M. Kaidi, J. A. Ardila-Rey, N. M. Samsuddin, M. N. Muhtazaruddin, F. Muhammad-Sukki, and S. A. Aziz, *IEEE Access*, **9**, 86869 (2021).
doi: <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3088761>
- [4] Semiconductors Play a Key Role in PV Inverters (2015).
https://solarpowermanagement.net/article/97030/Semiconductors_play_a_key_role_in_PV_inverters
- [5] J. H. Choi and U. M. Choi, *Trans. Korean Inst. Power Electron.*, **27**, 535 (2022).
doi: <https://doi.org/10.6113/TKPE.2022.27.6.535>
- [6] S. S. Kyung, S. M. Park, and P. J. Park, Next-Generation Power Semiconductor Device Technology/Processing-In-Memory-Based Neuromorphic Technology Trends, *Convergence Research Review*, **8**, 1 (2022).
- [7] Infineon Homepage, *Wide Bandgap Semiconductors (SiC/GaN)*.
<https://www.infineon.com/cms/en/product/technology/wide-band-gap-semiconductors-sic-gan/>
- [8] GaN Vs SiC Physic Properties (2021).
<https://electronics.stackexchange.com/questions/566211/gan-vs-sic-physic-properties>
- [9] E. Robles, A. Matallana, I. Aretxabaleta, J. Andreu, M. Fernández, and J. L. Martín, *Int. J. Energy Res.*, **46**, 22222 (2022).
doi: <https://doi.org/10.1002/er.8581>
- [10] F. Wang and Z. Zhang, *CPSS Trans. Power Electron. Appl.*, **1**, 13 (2016).
doi: <https://doi.org/10.24295/CPSSSTPEA.2016.00003>
- [11] S. Büttner and M. März, *Cryogenics*, **121**, 103392 (2022).
doi: <https://doi.org/10.1016/j.cryogenics.2021.103392>
- [12] H. C. Lim, Introduction to Electrical Engineering, Chapter 5 AC Circuit Analysis, p. 177.
- [13] S. A. Gorji, H. G. Sahebi, M. Ektesabi, and A. B. Rad, *IEEE Access*, **7**, 117997 (2019).
doi: <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2937239>
- [14] K. W. Seok and B. H. Kwon, *IEEE Trans. Ind. Electron.*, **48**, 1219 (2021).
doi: <https://doi.org/10.1109/41.969402>
- [15] F. Adel, A. E. Lashine, A. E. El-Sabbe, and D.S.M. Osheba, *Sci. Rep.*, **13**, 9009 (2023).
doi: <https://doi.org/10.1038/s41598-023-35770-9>
- [16] C. Buzzio, Y. S. Poloni, G. G. Oggier, and G. O. García, *Int. J. Electr. Power Energy Syst.*, **154**, 109399 (2023).
doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2023.109399>
- [17] B. Wang, J. Cai, X. Du, and L. Zhou, *CPSS Trans. Power Electron. Appl.*, **2**, 101 (2017).
doi: <https://doi.org/10.24295/CPSSSTPEA.2017.00011>
- [18] Electronics Tutorials, *MOSFET as a Switch*.
doi: https://www.electronics-tutorials.ws/transistor/tran_7.html (2023).
- [19] Tech Web, *IGBT Features: Comparisons with MOSFETs and Bipolar Transistors*.
doi: <https://techweb.rohm.com/product/power-device/igbt/igbt-basic/11651/> (2023).
- [20] A. Kimmel, *Why SiC is an Ideal Material for Green Energy Power Inverters* (2003).
<https://www.thelec.kr/news/articleView.html?idxno=21371>

- [21] D. Carroll, *Overcoming Power System Design Challenges in a 1500 VDC Photovoltaic System* (2018).
<https://www.digikey.kr/ko/articles/overcoming-power-system-design-challenges-in-1500-vdc-photovoltaic-systems>
- [22] Architecture for solar energy application (2014).
<https://www.hellot.net/news/article.html?no=17747>
- [23] H. Kyung and S. Kim, *KEIT Ind. Econ.*, **8**, 20 (2023).
- [24] D. Kwon, *Power Semiconductor Market Forecast to Reach \$36.9 Billion in 2030* (2023).
<https://www.etnews.com/20230531000123>
- [25] S. Noh, *Kiwoom Management, ETF Launches Korea's First Global AI Semiconductor and Power Semiconductor* (2023).
<https://www.dailian.co.kr/news/view/1307929>
- [26] Translated by Hak-gi Jeong (Written by Junichi Sato), Easy to Understand Basics and Structure of the Latest Power Semiconductors.
- [27] J. E. Lee, "Samsung Can't Win", Japan, Electric Vehicle Core Technology Power Semiconductor All-In, Asia Economy (2022).
<https://www.asiae.co.kr/article/2022111112592003880>
- [28] A. Villamor, *Power ICs: A \$21B Market Evident in All Applications* (2021).
<https://www.semiconductor-digest.com/power-ics-a-21b-market-evident-in-all-applications/>