

WBG 전력반도체를 적용한 무선전력전송 기술 동향

1. 서론

스위칭 소자 기반 전력회로의 소형 경량화를 위해서는 스위칭 소자의 고주파 대전력 성능 향상이 필수적이다. 이를 위해, 반도체 소자의 Bandgap을 크게 하여 스위칭 소자 성능을 향상시키고자 하는 계보는 현재까지 Si→SiC→GaN→Ga²O³ 순서로 이어져 오고 있다. 특히 전자기장을 활용하는 무선전력시스템(Wireless Power Transfer System, WPTS)의 경우, 동작주파수에 반비례하여 송신부(Tx) 및 수신부(Rx) 크기가 감소하므로 고주파 구동을 위한 송수신부 드라이빙 회로 설계가 중요하다. 본고에서는 전력용량 및 주파수 특성에 따라 WBG(Wide Bandgap) 소자가 적용된 무선전력시스템의 사례에 대해 소개하고자 한다.

2. WBG 소자 특성 비교

기존 실리콘(Silicon, Si) 기반 스위칭 소자는 주로 수십 kHz 동작주파수 수백 kW급 대전력 어플리케이션에 주로 사용되어

왔다. 특히 WBG 소자의 상용화가 진행되기 전인 2000년 초까지 Si 기반 스위칭 소자는 그림 1과 같이 모바일 디바이스와 같은 저전력부터 전기자동차(Electric Vehicle, EV)의 대전력까지 광범위하게 사용되었다. 기존 Si의 1.1eV급 밴드갭에서 약 3.3eV까지 밴드갭을 증가한 실리콘 카바이드(Silicon Carbide, SiC) 소자는 스위칭 소자의 전력용량과 동작주파수 특성을 대폭 향상시켰으며, 현재는 Si 반도체 소자를 대체하여 소전력부터 대전력까지 다양한 어플리케이션에 SiC 반도체 소자가 적용 중이다¹⁾.

한편, 우수한 전자 이동성과 강한 파괴 전압, 우수한 열전도 특성을 가진 질화갈륨(Gallium Nitride, GaN)을 사용하여 수십 MHz급 수준의 높은 스위칭 주파수로 구동할 수 있다. 수십 kV/수kA의 대전력 구동이 가능한 SiC 소자는 전력특성에 따라 MHz 동작주파수 구동이 어려우나, GaN을 이용할 경우 수십 MHz까지 스위칭 구동이 가능하므로, 동일한 전력용량 사용



그림 1 무선전력 주요 어플리케이션

표 1 전력반도체 소자 성능 비교

구분	Si	SiC	GaN
게이트소스 전압	(+)(-)20V	(+)(-)30V	0-(+)-8V
동작 전압/전류	수 kV/수백 A	수십 kV/수 kA	수백 V/수십 A
동작 주파수	< 수백 kHz	< 수 MHz	< 수십 MHz
최대 온도	약 300℃	약 400℃	약 800℃
무선전력 주요 사용처	전기자동차, 철도차량 등	전기자동차, 로봇, 가전제품 등	모바일, IoT, RF 전력 분야 등

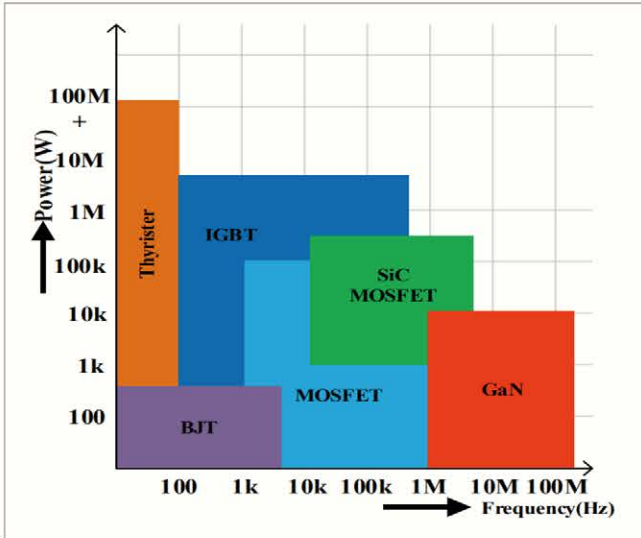


그림 2 전력 및 동작 주파수에 따른 스위칭 소자 특성 비교

가정 시 SiC 대비 GaN을 사용할 경우 전력밀도를 증가시킬 수 있다. GaN 소자를 활용한 무선전력의 주요 토폴로지는 Class-D 및 Class-E 인버터이며, 현재 국제 무선전력 규격단체 중 하나인 Air-Fuel Alliance에서 규정하는 최대 스위칭 주파수인 6.78MHz 또는 13.56MHz로 구동하기 위해 주로 GaN 소자가 사용된다⁵⁾.

최근 GaN 소자는 약 150V의 드레인 소스 전압 상황하, 게이트 소스 전압이 최대 8V까지 구동 가능한 소자가 개발되었다⁶⁾. Si 및 SiC의 게이트 소스전압은 양전압과 음전압 크기가 회로 기생 성분을 고려하더라도 설계 측면에서 비교적 여유로운 장점이 있으나, GaN의 경우 게이트 소스전압의 드라이빙 범위가 좁아 기생 공진에 의한 Peak 전압에 의해 스위치가 손상될 가능성이 크다. 또한 GaN 소자의 게이트-드레인 커패시터를 통해 발생하는 밀러 효과를 방지하기 위해 Turn-on 및 Turn-off 패스를 분리하는 것이 필수적이다⁶⁾. 이러한 GaN의 특성으로 인해, GaN용 게이트 드라이버는 Si 및 SiC와는 다른 특성을 가진 게이트 드라이버를 사용해야 한다.

상기 언급한 Si, SiC 및 GaN 소자의 주요 특성을 표 1 및 그림 2에 요약하였다. 1MHz 이하의 동작 주파수에 kW급 대용량 소자로서 SiC 소자가 널리 사용되는 반면, 수 MHz 수준의 고주파 동작에 수 kW급 이하 용량의 소자로 GaN이 주로 사용되고 있다. 표 1 및 그림 2에 나타난 바와 같이, 전력용량 및 동작 주파수 크기에 따라 WBG 스위칭 소자를 다양한 어플리케이션에 선별적으로 적용할 수 있다.

3. WBG 소자를 이용한 WPTS 연구 동향

3.1 SiC 기반 WPTS

SiC 소자는 수십 kHz에서 구동하는 대용량 어플리케이션에 가장 최적화된 WBG 소자이다. 그림 3와 같이, WBG 소자는 송신측 DC를 AC로 변환하는 고주파 인버터(High-frequency inverter)와 수신측 AC를 DC로 변환하는 컨버터(Converter)에 적용된다⁵⁾. EV의 경우 SAE J2954 규격에 따라 25-85kHz 범위의 동작 주파수가 주로 사용되며 전력용량은 수-수백 kW 수준이다.

EV용 무선전력시스템은 2000년부터 지금까지 많은 연구 결과가 있으며, 최근 고효율 고전력밀도를 위해서는 SiC 소자가 필수적으로 사용되는 추세이다. 2019년에는 Witricity가 90-280mm의 거리에서도 11kW급 전력을 92-94% 효율로 전송한 사례가 있다. 그림 4와 같이 Full-bridge 인버터의 Q3-Q6 소자를 N-channel 650V, 90A SiC MOSFET을 사용하여 29mΩ 수준의 낮은 턴온 저항을 가지며, 수신부 정류기측에도 30A 600V SiC Fast Rectifiers를 사용하여 다이오드의 Conduction loss를 줄이기 위해 노력하였다⁶⁾. SiC 소자는 EV용 무선전력시스템에

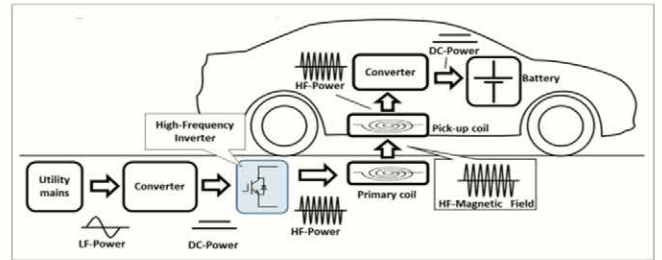


그림 3 EV에 적용된 WPTS 구조의 예⁵⁾

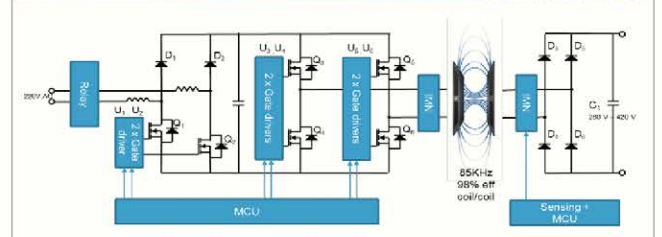


그림 4 Witricity에서 개발한 EV용 WPTS⁶⁾

적용되는 다양한 코일구조에서 널리 사용된다. 예컨대, 그림 5와 같이 송수신부간 Misalignment 허용오차를 줄이기 위해 수신코일 대비 상하좌우 길이가 넓은 송신코일을 사용할 수 있으며⁷⁾, 좌우 허용편차를 넓히기 위해 DD코일을 사용하는 것이 일반적이다⁸⁾. 코일 구조와는 상관없이 수십 kW급 25-100kHz 동작주파수에서 구동하는 송신부 고주파 인버터 및 수신부 정류기에는 SiC 소자를 활용함으로써 전체 시스템 효율을 최소 91% 이상 확보하는 추세이다^{6)~8)}.

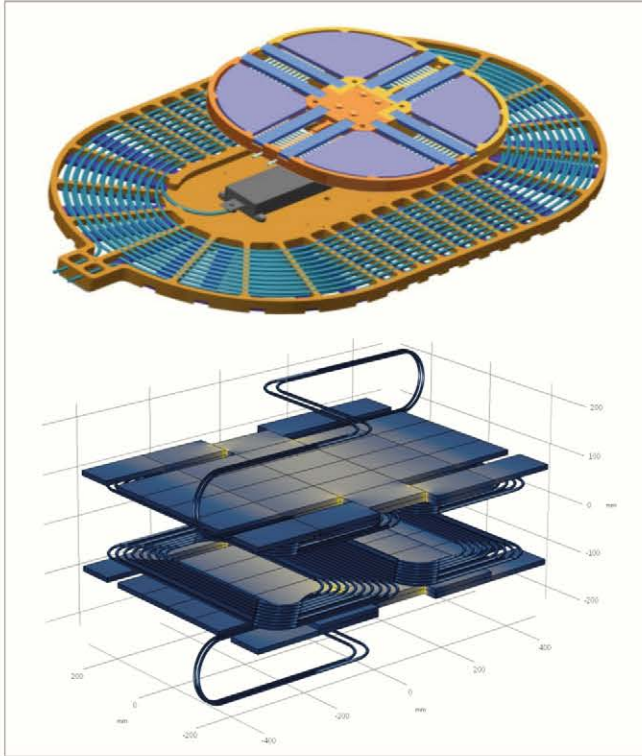


그림 5 Bosch(상) 및 Oak Ridge Lab(하)에서 개발한 코일구조의 예^{7)~8)}

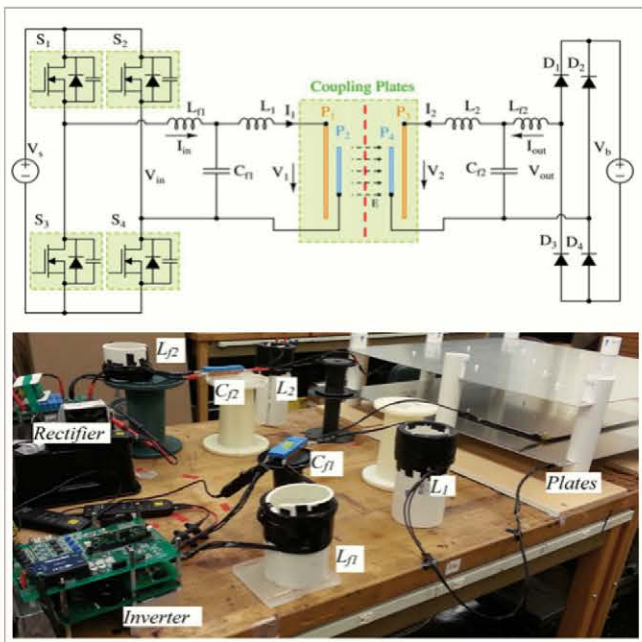


그림 6 CPT 회로도 및 실험세트의 예⁹⁾

EV와 기타 다른 WPT 어플리케이션의 경우, Near-field 자기장을 이용하는 Inductive Power Transfer(IPT) 방식이 일반적이거나, 도전성 물질(Conductive objects)의 접근에 의해 시스템 제어가 민감하게 영향을 받을 수 있으며, 자기장에 의해 발생하는 도전성 물질의 발열로 인해 화재가 발생할 수 있다는 단점이 있다⁹⁾. 이와 같은 이유로 자기장을 이용하는 IPT 대신 전기장을 이용하는 Capacitive Power Transfer(CPT)가 주로 연구된 바 있다. CPT의 경우 공극에 의한 낮은 커패시턴스로 인해 MHz급 고주파 구동이 필요하며, 이를 위해 Si 대비 주파수 특성이 우수한 SiC 소자가 필수적으로 사용된다. 그림 6과 같이 송수신부 간 공극은 넓은 커패시턴스를 포함하는 conductive plates(전도성 평판)가 사용되며, 고주파 공진을 위해 추가적인 인덕터가 사용된다. 고주파 구동에 따른 전도성 평판의 eddy loss, 공진형 인덕터의 conduction loss로 인해 IPT 대비 85.8%의 낮은 효율을 가지므로, 고주파 인버터 및 정류기의 손실 개선을 위해서라도 SiC 스위칭 소자 사용이 매우 중요하다⁹⁾.

EV용 IPT 및 CPT를 제외한 특별한 경우의 어플리케이션으로서, 3차원 공간 내 모바일 기기 및 IoT를 언제 어디서든 무선 충전할 수 있는 Wi-Power 기술이 소개된 바 있다¹⁰⁾. 무지향성 무선충전에 필수조건인 회전자계 생성을 위해, 천장에 고주파 자기장을 발생시키는 DQ 송신라인을 사용하였고, 인체안전을 위해 자기장 크기를 낮춘 대신 전력수신특성을 높이기 위해 6.78MHz의 고주파로 인버터 전류를 구동하였다.

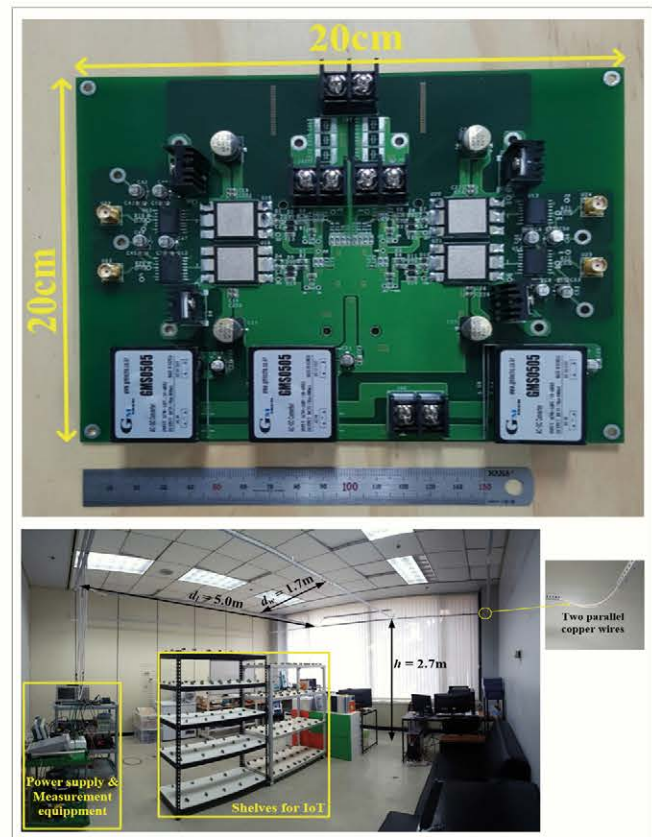


그림 7 SiC Class-D 인버터(상) 및 Wi-power 구축 환경(하)¹⁰⁾

표 2 SiC 소자 사용 WPTS 기술 요약

구분	[6]	[7]	[8]	[9]	[10]
사용처	EV	EV	EV	EV	Wi-Power
WPT 방법	IPT	IPT	IPT	CPT	IPT
개발 기관	Witricity	Bosch	Oak Ridge Lab.	Univ. Michigan	KAIST
주파수	85kHz	85kHz	22kHz	1MHz	6.78MHz
전송 용량[kW]	11.0	7	100	1.88	0.17
전체 효율[%]	92-94	91.0	96.9	85.8	9.3
거리[mm]	90-280	85	127	150	3,000

그림 7과 같이 SiC 소자를 이용하여 DQ Class-D 인버터를 사용하였으며, 이를 통해 천장 DQ 송신라인에 6.78MHz 고주파 전류를 구동할 수 있다. 다만 SiC 소자 자체의 상대적으로 큰 drain-source 기생 커패시턴스로 인해 6.78MHz 구동 시 zero-voltage-switching(ZVS)을 위한 전류 여유가 대체로 부족한 편이므로, 6.78MHz 이상 주파수부터는 SiC 소자를 사용하기 어렵다고 판단된다^[10]. 그러므로 수십 kVA급 용량보다는 작으나, 6.78MHz 이상 안정적인 고주파 스위칭을 위해서는 그림 2에서와 같이 SiC 대신 GaN 소자를 사용하는 것이 적절하다. 본 절에서 설명한 SiC 소자 기반 WPTS 기술을 표 2에 요약하였다.

3.2 GaN 기반 WPTS

앞서 설명한 SiC 대비 기생 커패시턴스가 더 작고 전력밀도를 더 높은 GaN 소자를 스위칭 소자로써 사용할 수 있다. GaN 반도체는 Si에 비해 10배 이상의 높은 항복전압을 가지므로 실리콘 소재 기반의 전력반도체 대비 스위칭 소자 크기를 최소 2배 이상 소형화할 수 있는 장점이 있다^[11]. 즉, GaN 소자는 Drain-source 커패시턴스 및 Gate-source 커패시턴스를 수백 pF 이하로 낮추어 MHz 범위의 주파수 구동에서도 이상적인 동작이 가능하다.

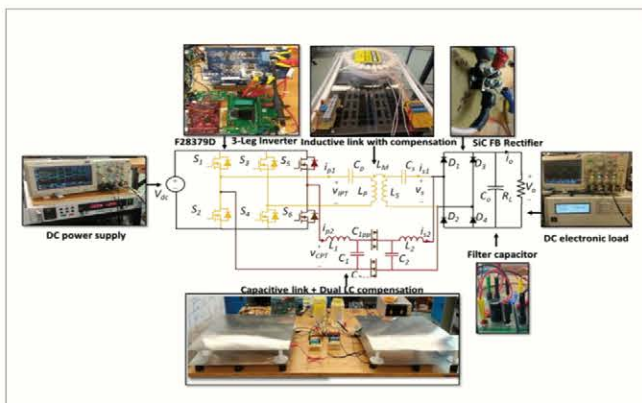


그림 8 SiC 및 GaN 하이브리드 인버터 구조의 예^[14]

GaN 소자를 활용한 무선전력용 스위칭 구동을 위해, Class D 및 Class E 토폴로지가 가장 널리 활용된다. Class D 토폴로지는 기생성분에 의한 Voltage-spike가 없다면 입력전압만큼의 전압 스트레스만 부담하면 되나, 2개 또는 4개의 GaN 소자가 필요하다는 단점이 있다. 반면, Class E의 경우 1개의 GaN 소자만이 필요하므로 시스템 비용이 절감되는 장점이 있으나, 입력전압의 2.3배 이상의 전압 스트레스가 인가된다는 단점이 있다. 그러므로 GaN 소자 기반 Class-D 또는 Class-E 인버터 토폴로지는 주로 ISM band인 6.78MHz 이상의 고주파 영역에서 구동하며, 100W 이상 용량의 경우 Class-D를, 100W 미만의 경우 Class-E를 사용하는 것이 일반적으로 전력밀도 측면에서 유리하다^{[11][12]}.

표 1과 같이, GaN은 SiC 대비 전력용량이 작으나, 최근 650V 30A급 고용량 GaN 스위치가 출시되는 등 대용량 GaN 스위칭 소자가 점점 상용화되고 있는 추세이다. 이를 통해 SiC 소자 대비 단점으로 지적되는 GaN 스위칭 전력용량 증가와 함께 전체 회로의 전력밀도 증가가 가능하며, 6.78MHz급 고주파 구동에도 55mm 거리, 1.7kW 전력전송 시 95.7%급 DC/DC 고효율 달성이 가능하다^[13].

고주파 구동용 GaN을 사용한 WPTS의 특별한 구조로서, 85kHz IPT부는 SiC, 1MHz급 CPT부는 GaN을 사용한 Hybrid WPT가 제안된 바 있다^[4]. 그림 8과 같이, IPT와 CPT의 각 장점을 결합하기 위해 두 종류의 WPT 방식을 하나의 3-leg 인버터로 구현할 수 있으며, 주파수 특성상 수십 kHz인 IPT에는 SiC, 수 MHz인 CPT에는 GaN을 사용함으로써, 각 주파수 특성에 맞는 스위칭 소자를 적용할 수 있다. 본 절에서 설명한 GaN 소자를 사용한 WPTS 기술을 표 3에 요약하였다.

표 3 GaN 소자 사용 WPTS 기술 요약

구분	[11]	[12]	[13]	[14]
사용처	Electric forklifts	Portable devices	-	Autonomous vehicle(AV)
토폴로지	Class-D	Class-E	Class-D	Class-D
개발 기관	Univ. Colorado	NEC Corp.	Stanford	Univ. Ontario
주파수	6.78MHz	6.78MHz	6.78MHz	85kHz & 1MHz
전송 용량[W]	257	70	1,700	500
전체 효율[%]	90.4	90.0	95.7	85.4
거리[mm]	12	-	55	100

4. 결론

본고에서는 WBG의 기본적인 특성과 WBG 스위칭 소자를 무선전력에 적용한 여러 사례에 대해 소개하였다. 전력전자 기술의 가장 중요한 목표인 고주파수 동작 및 저손실화를 통한 소형 경량화는 WBG 소자 성능 향상에서부터 시작된다. 최근에는 상기 언급한 WBG용 SiC와 GaN보다 더 우수한 고전압 동작, 고집적화 및 경량화 성능을 가진 Ga^2O^3 를 활용한 반도체 소자 개발에 집중하고 있다¹⁵⁾. Ga^2O^3 는 SiC와 GaN에 비해 더 넓은 에너지 밴드갭을 가지는 소재로서 용액 성장을 통한 단결정 기판 제작이 가능하여 최근 활발하게 연구 개발이 진행되고 있다¹⁶⁾. Ga^2O^3 가 전력전자 분야에 적용되면 고주파수 동작 및 저손실화 등 더욱 향상된 소자 특성을 기대할 수 있을 것으로 예상된다. ■

참고문헌

- [1] 우현민, 안준영, 이명준, 나재두, “차세대 전력반도체 SiC와 GaN의 응용,” The Korean Institute of Electrical Engineers, Vol. 63, No. 5, pp. 24-28, 2014.5.
- [2] “와이드 밴드갭 반도체를 이용한 무선 충전 설계하기,” Elec4, 2019.2.8.
- [3] 스마트앤컴퍼니, “[제품 리뷰] 로옴, 150V GaN HEMT 최고 8V 게이트 내압 기술,” Elec4, 2021.4.8.
- [4] 안정훈, 이병국, 김종수, “Si MOSFET과 GaN FET Power System 성능 비교 평가,” 전력전자학회 논문지, Vol. 19, No. 3, pp. 283-289, Jun. 2014.
- [5] J. Liu, Y. Zhang, Z. Wang, and M. Cheng, “A study of a newly developed Kelvin-source driven SiC-VMOSFET on a high-power single-ended wireless EV charger,” in 8th International Conference on Renewable Energy Research and Applications (ICRERA), pp. 40-44, Nov. 2019.
- [6] WiTricity Electric Vehicle Charger, [Online]. Available: <https://witricity.com/products/automotive>.
- [7] P. Schumann et al., “Compact 7 kW inductive charging system with circular coil design,” in 5th International Electric Drives Production Conference (EDPC), pp. 1-5, Sep. 2015.
- [8] V. P. Galigekere et al., “Design and implementation of an optimized 100 kW stationary wireless charging system for EV battery recharging,” IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE), pp. 3587-3592, Sep. 2018.
- [9] H. Zhang et al., “A four-plate compact capacitive coupler design and LCL-compensated topology for capacitive power transfer in electric vehicle charging application,” IEEE Trans. Power Electron., Vol. 31, No. 12, pp. 8541-8551, Dec. 2016.
- [10] E. S. Lee et al., “Six degrees of freedom wide-range ubiquitous IPT for IoT by DQ magnetic field,” IEEE Trans. Power Electron., Vol. 32, No. 11, pp. 8258-8276, Nov. 2017.
- [11] S. Sinha et al., “A very-high-power-transfer-density GaN-based capacitive wireless power transfer system,” IEEE 5th Workshop on Wide Bandgap Power Devices and Applications (WiPDA), pp. 360-365, Nov. 2017.
- [12] C. H. Yeh et al., “A 70W and 90% GaN-based class-E wireless-power-transfer system with automatic-matching point-search control for zero-voltage switching and zero-voltage-derivative switching,” IEEE International Solid - State Circuits Conference - (ISSCC), pp. 138-139, Feb. 2018.
- [13] L. Gu and J. Rivas-Davila, “1.7 kW 6.78 MHz wireless power transfer with air-core coils at 95.7% DC-DC efficiency,” IEEE Wireless Power Transfer Conference (WPTC), pp. 1-4, Jun. 2021.
- [14] D. Vincent et al., “A link independent hybrid inductive and capacitive wireless power transfer system for autonomous mobility,” IEEE J. of Emerg. and Sel. Top. in Ind. Electron. (JESTIE), early access.
- [15] 지재훈, 고중혁, “전력 반도체용 갈륨 옥사이드 (Ga2O3) 연구 동향,” Bulletin of the Korean Institute of Electrical and Electronic Material Engineers, Vol. 30, No. 6, pp. 3-9, 2017.
- [16] 기획재정부, “차세대 전력 반도체 기술개발 및 생산역량 확충 방안,” 2021.3.

이은수 한국철도기술연구원 스마트전기신호본부 선임연구원

1986년 12월 20일생. 2012년 인하대 전기공학과 졸업. 2014년 한국과학기술원 원자력 및 양자공학과 졸업(석사).

2017년 한국과학기술원 원자력 및 양자공학과 졸업(공학박사). 2015년~2017년 ㈜플렉스파워 기술이사.

2017년~2019년 ㈜LG전자 CTO 전력전자연구소 무선전력팀 선임연구원. 2019년~현재 한국철도기술연구원 스마트전기신호본부 선임연구원.

