

# SiC MOSFET기반 200kW급 전기차 구동용 모터드라이버 개발

## Development of 200kW class electric vehicle traction motor driver based on SiC MOSFET

김 연 우<sup>\*,★</sup>, 김 세 환<sup>\*</sup>, 김 민 재<sup>\*</sup>, 이 의 형<sup>\*</sup>, 이 성 원<sup>\*</sup>

Yeonwoo Kim<sup>\*,★</sup>, Sehwan Kim<sup>\*</sup>, Minjae Kim<sup>\*</sup>, Uihyung Yi<sup>\*</sup>, Sungwon Lee<sup>\*</sup>

### Abstract

In this paper, A 200kW traction motor driver that covers most of the traction motor specification of commercial electric vehicles (EV) is developed. In order to achieve high efficiency and high power density, a next-generation power semiconductors (Silicon carbide, SiC) are applied instead of power semiconductor(IGBT), which is Si based. Through hardware analysis for optimal use of SiC, expected efficiency and heat dissipation characteristics are obtained. A vector control algorithm for an IPMSM (Interior permanent magnet synchronous motor), which is mostly used in EV(Electric vehicle) traction motor, is implemented using DSP (Digital signal processor). In this paper, a prototype traction motor driver based SiC for EV is designed and manufactured, and its performance is verified through experiments.

### 요 약

본 논문에서는 현재 출시되어 있는 전기차의 구동모터 사양을 대부분 포괄하는 200kW급 구동용 모터드라이버를 개발하였다. 고 효율·고전력밀도를 달성하기 위해 기존 전력반도체(Insulated-gate bipolar transistor, IGBT)대신에 차세대 전력반도체(Silicon carbide, SiC)를 적용하였으며 SiC를 최적사용하기 위해 하드웨어에 대한 분석을 통해, 예상되는 효율 및 방열특성을 구하여 최적 설계를 하였다. 전기차 구동모터에 대부분 활용되는 매입형 영구자석 동기모터(Interior permanent-magnet synchronous machine, IPMSM)를 위한 벡터 제어 알고리즘을 DSP를 활용하여 구현하였다. 본 논문에서는 SiC기반 전기차 구동용 모터드라이버 시작품을 설계·제작하였으며 실험을 통해 성능을 검증하였다.

*Key words : Traction motor driver, SiC(Silicon carbide), High efficiency, Improved cooling performance, IPMSM, Vector control algorithm, EV(Electric vehicle)*

\* Korea Institute of Machinery & Materials

★ Corresponding author

E-mail : woo@kimm.re.kr, Tel : +82-51-310-8123

※ Acknowledgment

This research was supported by a grant of the Basic Research Program funded by the Korea Institute of Machinery and Materials(grant number: NK240A).

Manuscript received Dec. 7, 2022; revised Dec. 20, 2022; accepted Dec. 20, 2022.

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.

### 1. 서론

최근 환경오염과 규제로 인해 탄소중립을 필두로 친환경 자동차의 연구개발이 활발히 이루어지고 있다[1-2]. 특히 전기자동차 시장의 가속화로 인해 완성차량 제조사, OEM 및 관련 부품사들은 다양한 차종 및 컨셉트 카를 출시하고 있으며 고성능 전기차 및 상용전기 트럭 등 시장에서 차량 동력원의 전동화 추세에 따라 다양한 니즈를 만족하기 위해 연구개발 및 상용화가 활발히 이루어지고 있다. 전기자동차의 핵심 구성요소로서, 전기차 구동시스템은 그림 1, 2와 같이 동력을 발생하는 전동기

(구동모터)와 동력을 발생하도록 제어하는 인버터(모터 드라이버)로 구성되어 있으며 전동기 축에 감속기 또는 변속기를 연결하여 회전력을 바퀴에 전달하여 차량을 구동시킨다.

전기자동차의 성능을 좌지우지 하는 것은 구동시스템의 토크 및 속도, 1회 충전당 주행거리, 넓은 실내공간 또는 적재공간 등이 있다. 차량의 용도에 따라 구동시스템은 고속/저토크 모터 또는 저속/고토크 모터를 적용하며, 높은 토크를 위해서는 높은 전력 정격의 구동모터와 인버터가 필요하다. 차량 내 제한된 공간에 장착하고 500~600km이상의 1회 충전당 주행거리를 위해서는 전력변환장치(인버터, 컨버터)의 소형경량화 및 고전력 밀도화와 함께 고효율이 달성되어야 한다. 또한 전기차의 낮은 운영비용 덕택으로 긴 운영시간(연간 50,000~80,000 mile)과 높은 신뢰성이 요구되는 카셰어링, 커넥티드 택시/버스와 같은 MaaS(Mobility as a service) 분야에 널리 사용되므로 구동시스템의 신뢰성이 300,000mile 이상으로 도달해야 한다[3-4].

전기차용 전력변환장치의 성능 및 신뢰성을 향상시키기 위해 차세대 전력반도체(Wide band gap, WBG)가 각광을 받고 있다. 기존에 보편적으로 사용되었던 Si 전력반도체(MOSFET, IGBT)에 비해, WBG 전력반도체를 구성하는 SiC(Silicon carbide) 및 GaN(Gallium nitride) 전력반도체의 경우 고온동작, 낮은 도통손실, 높은 전압 정격, 향상된 방열시스템 적용성, 고속 스위칭 성능 등의 장점을 가진다[5-7]. 이러한 특징을 통해 WBG 전력반도체를 전력변환장치에 적용할 경우, 고효율·고전력밀도화 및 고신뢰성을 가질 수 있다. SiC, GaN기반의 전력반도체 소자 둘 다 고전력밀도화를 위한 고주파 스위칭에 적합하지만, SiC가 GaN보다 고전압 특성이 우수하여 구동모터 인버터에 활용하기 적합하다[8].

한편, 전기차 구동모터로는 영구자석을 회전자 내부에 삽입한 구조를 가지는 매입형 영구자석 동기모터(Interior permanent-magnet synchronous machine, IPMSM)를 많이 사용한다. 그 이유는 d축과 q축 인덕턴스 편차에 의해 발생하는 릴럭턴스 토크를 활용할 수 있어서 체적대비 높은 토크를 낼 수 있고 효율이 높기 때문이다. 또한 저속영역에서의 토크 특성과 고속영역에서의 약계자 제어 성능이 좋은 특징을 가지고 있다[9-10]. IPMSM의 효율적인 제어를 위해서는 벡터제어가 수행되어 하며, 이를 위해서 회전자 자속의 정확한 위치정보를 필요로 한다[11].

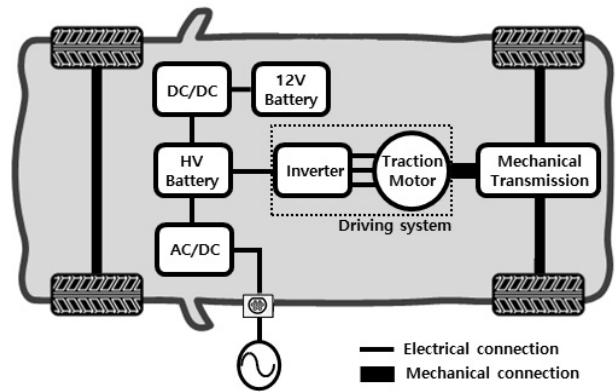


Fig. 1. General configuration of driving system for electric vehicle.

그림 1. 일반적인 전기자동차 구동시스템 구성도

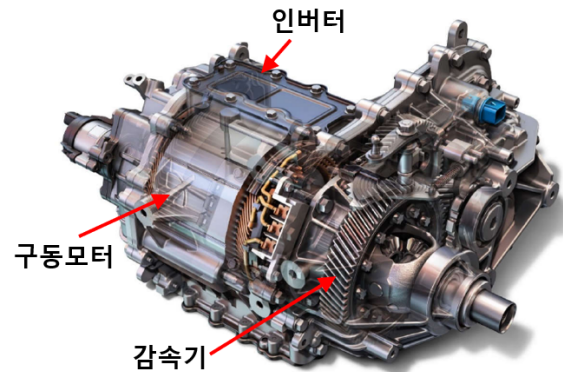


Fig. 2. A picture of a typical electric vehicle drive system. 그림 2. 일반적인 전기자동차 구동시스템 사진[3]

본 논문에서는 전기차 구동용 모터드라이버의 고효율·고전력밀도를 달성하기 위해 기존에 적용되어진 IGBT대신에 SiC를 적용하였으며, SiC를 최적조건으로 사용하기 위해 하드웨어에 대한 분석을 통해 예상되는 효율 및 방

Table 1. Specifications of previously released EV traction motor.

표 1. 기 출시된 전기차 구동모터 사양[12]

Brand	Model	Rotor Type	Winding Type	Max. Power/Torque
Tesla	Model S	SCIM	Random	310kW/600Nm
Chevy	Bolt	IPM	Hairpin	150kW/360Nm
BMW	i3	IPM	Random	125kW/250Nm
Tesla	Model 3	IPM	Random	210kW/450Nm
Audi	e-Tron	SCIM	Random	140kW/314Nm
Porsche	Taycan	IPM	Hairpin	345kW/499Nm
VW	ID.4	IPM	Hairpin	150kW/310Nm
Hyundai	Ioniq 5	IPM	Hairpin	150kW/350Nm

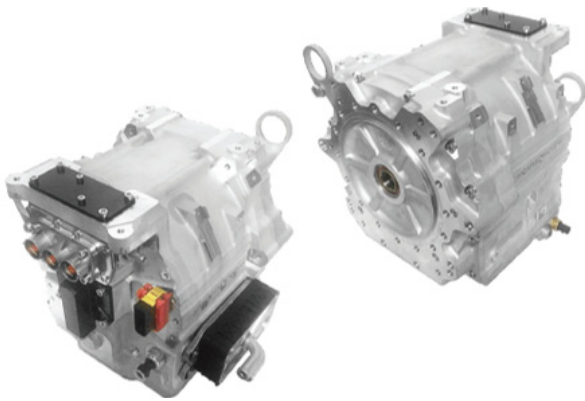


Fig. 3. A picture of IPM motor selected.  
그림 3. 선택한 IPM 모터의 사진[16]

열특성을 구하여 최적설계를 하였다. 또한 IPMSM의 벡터제어를 위한 동기좌표계 PI전류제어기를 DSP를 활용하여 구현하였다. 본 논문은 본론 1장에서 현재 출시되어 있는 전기차 구동모터의 사양, 2장에서 SiC 최적사용을 위한 하드웨어 분석, 3장에서는 제어알고리즘, 4장에서는 실험결과에 대해서 다룰 것이며 구동모터 드라이버 시작품을 통한 실험으로 검증하였다.

II. 본론

1. 전기차 구동용 모터와 모터드라이버의 사양

표 1은 시중에 이미 출시된 완성차제조업체 대표 전기차 모델의 구동용 모터 사양을 정리한 것이다[12]. 모터의 일반적인 구성요소인 회전자와 고정자의 타입, 최대출력과 최대토크에 따라 비교하였다. 회전자에 영구자석 포함여부에 따라 농형유도전동기(Squirrel cage induction motor, SCIM)와 매입형 영구자석 전동기(Interior permanent-magnet motor, IPM)로 구분되는데, Model S(Tesla)와 e-Tron(Audi)을 제외하고 주로 IPM을 전기차 구동모터에 적용하고 있다. IPM이 SCIM보다 효율이 높고, 출력 밀도가 높아서 가장 널리 채택되어 사용되고 있다[13-14]. 고정자의 권선 유형은 Random과 Hairpin으로 두 가지로 구분된다. Hairpin 권선은 Random 권선에 비해 더 쉬운 제조공정을 가지며 점적률(Slot fill factor)이 높아서 허용된 전류사양이 더 높다. 이에 따라 높은 토크 및 저속에서 모터의 성능이 향상된다. 또한 콤팩트한 모터 설계가 가능하여 DC 구리손실이 줄어들고 출력 밀도를 높일 수 있는 장점이 있다. 하지만, 모터의 설계 유연성이 낮고, 고속회전 시 AC손실이 더 높아 효율이 떨어지는 단점이 있다[15].

Table 2. Development specifications of EV traction motor.  
표 2. 전기차 구동모터 드라이버 개발 사양

Power	200kW	
$I_{out,rms}$	3phase, 435A (@460V <sub>rms</sub> )	
$I_{out,peak}$	± 750A	
$V_{in,dc}$	≤ 800V	
$I_{in,dc}$	± 260~430A	(260A, @800V)
		(430A, @480V)
Efficiency	98%	
Switching freq.	≥ 50kHz	
Operating Ambient temp.	-20~85℃	

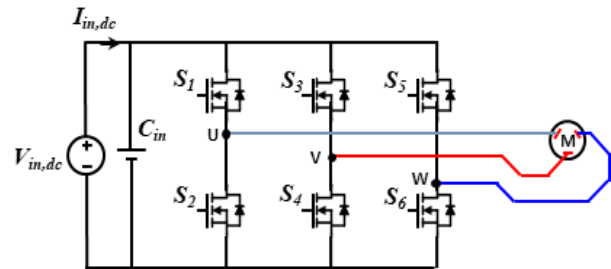


Fig. 4. Topology of traction motor drive.  
그림 4. 구동용 모터드라이버 회로

시중에 출시된 완성차제조업체의 전기차 구동용 모터의 사양을 보면 100kW에서 350kW까지 다양하게 포진되어 전기차 이용자의 다양한 니즈를 만족시키고 있다. 고성능 전기차로서 Model S(Tesla)와 Taycan(Porsche)을 들 수 있는데, 고성능 전기를차를 제외하고는 대부분의 전기차 구동용 모터가 약 200kW 이내에 포진된 것을 볼 수 있다. 본 논문에서는 현재 출시되어 있는 전기차 구동모터 사양을 대부분 포괄하는 모터드라이버를 개발하기 위해 200kW 사양을 가지는 IPM 모터를 선정하였다. 그림 3과 같이 BorgWarner사의 HVH250-115을 사용하였고, 최대출력/최대토크 기준 200kW/400Nm의 사양을 가진다[16]. 선정된 모터를 구동시키기 위해 모터드라이버의 사양도 200kW로 선정하였으며, SiC를 최적으로 사용하기 위해 다음 장에서 하드웨어를 분석하였다.

2. SiC 최적사용을 위한 하드웨어 분석

현재 출시되어 있는 전기차 구동모터들을 구동하기 위한 범용 드라이버로서 개발사양은 표 2와 같다. 전기차의 시스템 효율 향상 및 파워케이블 하네스의 절감 효과

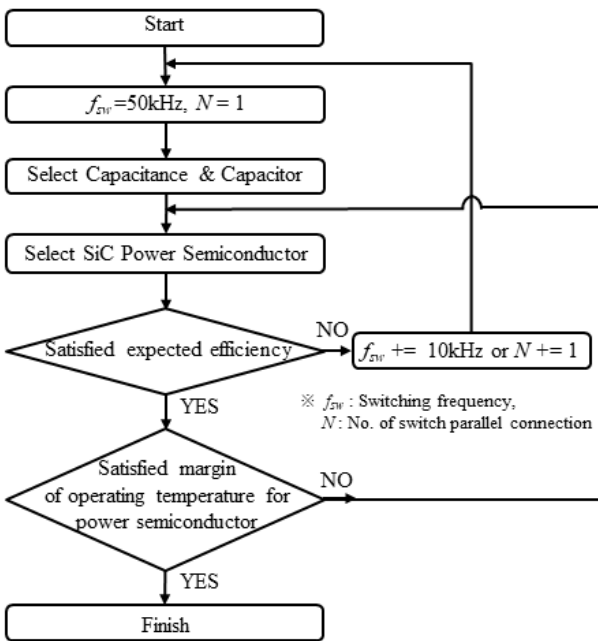


Fig. 5. Flow chart for design of traction motor drive.  
그림 5. 구동모터 드라이버 설계 순서도

등의 이유로 DC-Link전압이 400Vdc에서 800Vdc로 상승하고 있다. 다양한 전기차의 구동모터를 구동하기 위해 입력전압의 최대 전압은 800V이며 최대전류는 DC-Link가 400V대에서 동작하는 경우를 고려하여 사양을 선정하였다.

2.1 구동모터 드라이버 설계 순서도

구동모터 드라이버 회로도도 그림 4와 같이 일반적인 3상 하프브리지 타입으로 선정하였다. SiC 전력반도체를 그림 4의 회로에 최적조건으로 사용하기 위해서는 사용 조건에 따른 예상되는 효율과 온도 특성 등을 고려해야 한다. 이를 위한 설계 순서도는 그림 5와 같다.

일반적으로 스위칭 주파수에 따라 수동소자의 부피가 결정되며, IGBT 특성상 Minority carrier 특성으로 인한 잔여전류(Tail Current)가 턴 오프시 발생하여 스위칭 주파수가 10kHz 대 영역에서 스위칭이 제한되어 기존에 IGBT를 활용한 모터드라이버는 고전력 밀도화하는데 한계가 있다[17-18]. 이를 극복하기 위해 SiC를 적용하게 되는데, SiC는 기존의 IGBT보다 내부적으로 드리프트층 저항이 낮고 단위 면적당 온 저항을 낮추기 위한 소수 캐리어를 주입하지 않아도 되기 때문에 Tail Current가 없어서 고속스위칭이 가능하다[19]. 이에 따라, 그림 5의 SiC기반 모터드라이버 설계순서도는 스위칭 주파수를 50kHz부터 시작하였다.

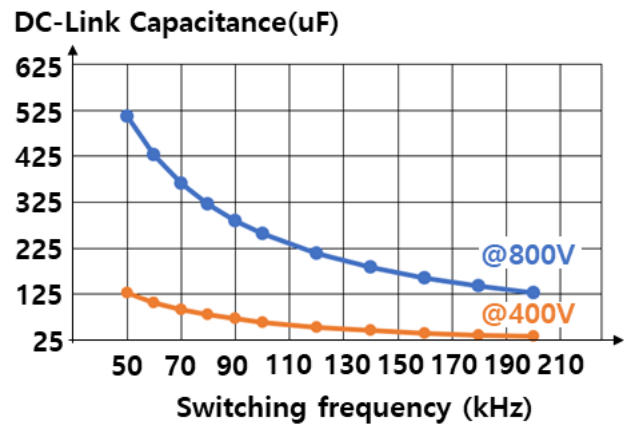


Fig. 6. Graph of DC-Link capacitance according to Switching frequency.  
그림 6. 스위칭주파수에 따른 DC-Link 커패시턴스 그래프

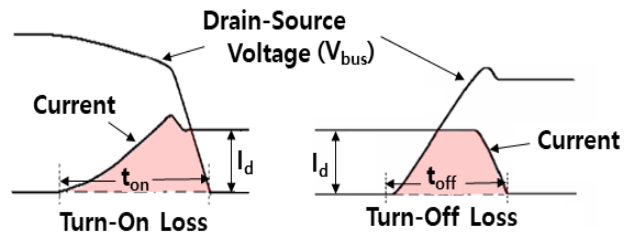


Fig. 7. Switching loss of power semiconductor.  
그림 7. 전력반도체 스위칭 손실[21]

2.2 DC-Link 커패시터 설계

설계 순서도의 커패시턴스는 아래의 수식 (1)을 이용하여 스위칭주파수에 따른 최소 커패시턴스를 구하였다 [20]. DC-Link 전압이 800V일 때와 400V일 때 각각에 대해서 전압 변동률 5% 감안하여 최소 커패시턴스를 구한 결과 그림 6과 같은 그래프 나왔다.

$$C_{min} = \frac{2P_{out}}{f_{sw} \cdot (V_{max}^2 - V_{min}^2)} \tag{1}$$

2.3 계산 효율 분석

SiC 전력반도체를 최적선정하기 위해 동작온도에 따른 전류사양과 전압사양, 계산효율, 예상방열 등을 비교하였다. 계산효율은 예상되는 손실을 구하여 수식 (2)를 통해 추정할 수 있으며, 예상되는 손실은 크게 4가지로 이루어져 있다. 전력반도체의 스위칭 손실과 도통손실, 커패시터의 직렬기생 저항(Equivalent series resistance, ESR)에 의한 손실과 기타손실로 구분할 수 있다.

$$efficiency(\%) = \frac{P_{out} - Loss}{P_{out}} \times 100 \tag{2}$$

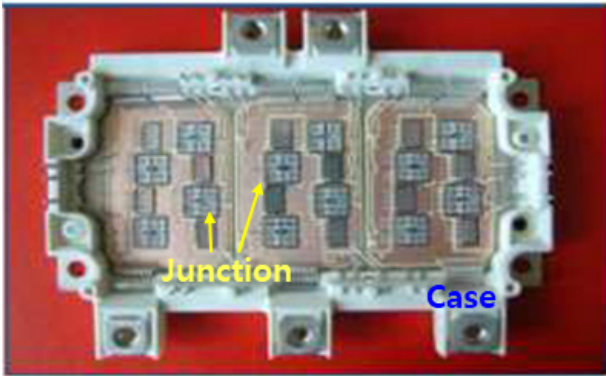


Fig. 8. Inside photo of power semiconductor.  
그림 8. 전력반도체 내부 사진[22]

스위칭 손실은 전력반도체가 턴 온, 턴 오프 하는 과정에서 발생하는 손실이다. 그림 7과 같이 전력반도체에 걸리는 전압과 흐르는 전류의 교차되는 면적이 스위칭 손실을 의미하며 전력반도체 1개의 스위칭 손실은 수식 (3)을 통해 구할 수 있다[21]. 수식 (3)은 전력반도체가 턴 온, 턴 오프 시 전력반도체에 걸리는 전압과 흐르는 전류의 교차면적을 평균적으로 계산하는 항과 전력반도체의 기생 커패시터로 인한 손실을 구하는 항으로 이루어져 있는데, 기생 커패시터의 영향이 작아서, 앞서 언급한 교차면적을 구하는 항이 스위칭 손실에 대부분을 차지한다.

$$P_{sw} = [0.5 I_d V_{bus} f_{sw} (t_{on} + t_{off})] + [0.5 C_{oss} V_{bus}^2 f_{sw}] \quad (3)$$

도통손실은 전력반도체의 기생 저항성분 때문에 발생하는 손실로 수식 (4)를 통해 구할 수 있고, 커패시터 ESR 손실은 커패시터 내부에 직렬기생 저항성분 때문에 발생하는 손실이며 수식 (5)를 통해서 구할 수 있다[22]. 수식 (5)의  $R_{ESR}$ 와  $N_{capacitor}$ 는 커패시터의 직렬기생저항과 커패시터 병렬연결 개수를 각각 의미하고 있으며, 임피던스를 구하기 위한 수식이 내포되어 있다.

$$P_{cn} = I_{rms}^2 R_{DS(on)} \quad (4)$$

$$P_{capacitor\ ESR} = \frac{I_{rms}^2 R_{ESR}}{N_{capacitor}} \quad (5)$$

#### 2.4 방열설계 분석

SiC 전력반도체 내부는 그림 8과 같으며, 내부 구성은 스위치 역할을 하는 Junction부분과 이 부분을 둘러싸는 Case로 구성되어 있다[23]. 전력반도체를 실제로 사용하는 환경에서 Junction부분의 온도를 확인하는데 제

Table 3. Selected components of traction motor driver.

표 3. 선정된 구동모터 드라이버 구성요소

Item	Value
SiC power semiconductor	FF2MR12KM1(Infineon)
Switching frequency	70kHz
No. of switch parallel connection	2
DC-Link Capacitance	400uF
Capacitor	FFVE6L0107K (AVX)
Thermal resistance between Heatsink and ambient	0.007(°C/W)
Cooling	Water (10LPM)

한되기 때문에 Case 온도를 통해 Junction 부분의 온도를 모니터링 하게 된다. 이를 위해서 케이스 동작온도 범위 확인이 필요하며 케이스 동작온도는 수식 (6)을 통해서 구할 수 있다.

$$T_{case} = T_{junction} - (P_{dissipation} R_{\theta j-c}) \quad (6)$$

또한 효율적인 열관리를 위해서 방열판의 열저항 ( $R_{\theta hs-a}$ ) 설계가 필요하다. 방열판의 열저항을 구하는 수식은 수식 (7)과 같다.

$$R_{\theta hs-a} = \frac{T_{junction} - T_{ambient}}{P_{dissipation}} - (R_{\theta j-c} + R_{\theta c-hs}) \quad (7)$$

#### 2.5 소자선정 및 그에 따른 분석

그림 5의 설계순서도에 따라 효율, 방열성능, 단가 등을 고려하여 표 3과 같이, Capacitor는 AVX사의 FFVE6L0107K(100uF)를 4개 병렬 연결하는 것으로 설계하였고, SiC 전력반도체는 모듈형 하프브릿지 타입으로 선정하여 콤팩트한 설계가 가능하도록 하였으며 Infineon사의 FF2MR12KM1을 각 상별로 2개씩 병렬연결 하는 것으로 설계하였다. 또한 스위칭 주파수는 70kHz, 방열판 열저항은 0.007°C/W로 설계하였다.

부하에 따른 구동모터 드라이버의 예상효율을 구한결과 그림 9와 같이 80kW 부하에서 최고효율 99.4%, 최대부하 조건에서 99.14%의 효율이 나올 것으로 예상되며 목표사양을 만족한다. 또한 최대부하(200kW) 조건에 예상되는 손실을 분석한 결과 그림 10과 같다. 총 손실은 1722W이고, 도통손실이 1364W로 총 손실 대비 약 80%를 차지하며 스위칭 손실은 355W로서 총 손실 대비 약 20%를 차지한다.

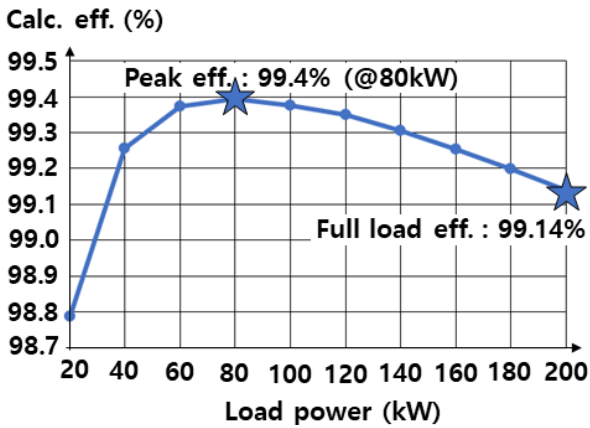


Fig. 9. Calculated efficiency graph according to load.  
그림 9. 부하에 따른 계산 효율 그래프

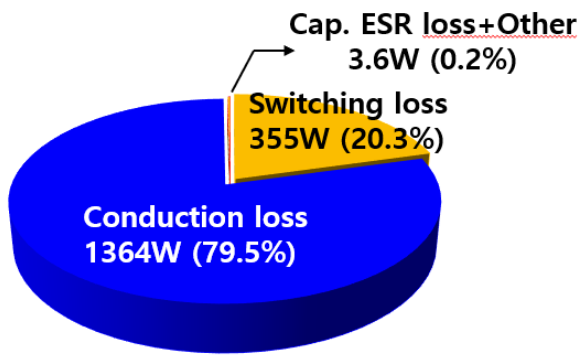


Fig. 10. Analysis of expected power loss at full load (200kW).  
그림 10. 최대부하(200kW)에서 예상손실 분석

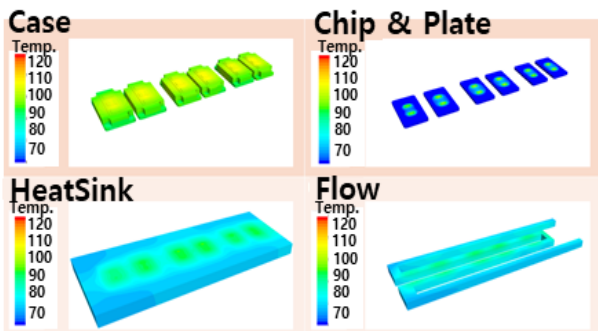


Fig. 11. Thermal analysis for traction motor driver.  
그림 11. 구동모터 드라이버 열해석

방열시스템은 전기차 부품에서 일반적으로 적용하는 수 냉식 방열로 선정하였고, 원활한 실험을 위해 유속 및 압력 등을 실험환경에 사용하는 칠러(냉각기)의 사양에 맞추었다. 방열성능을 분석하기 위해 열해석 툴(Simcenter STAR-CCM+)을 이용하여 3차원 유체해석(Computational fluid dynamics, CFD)을 통해 그림 11과 같은 결과를 도출하였다. 외기온도 85℃, 냉각수 온도 65℃조건에서

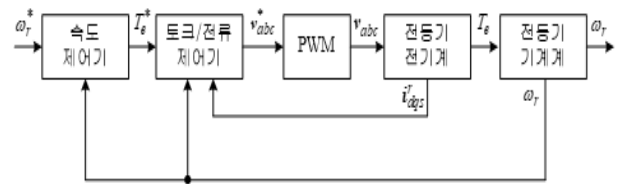


Fig. 12. Control algorithm diagram for traction motor.  
그림 12. 구동모터 제어 알고리즘 구성도

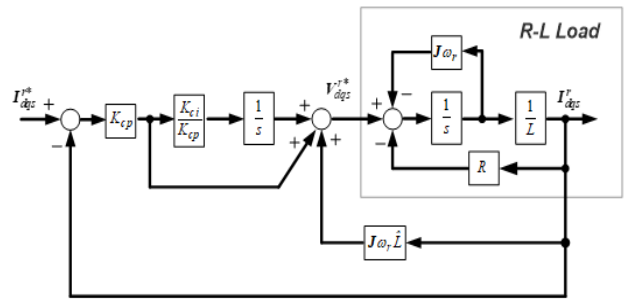


Fig. 13. PI current controller of Current feedback non-interference synchronous coordinate system.  
그림 13. 전류 제한 비간섭 동기좌표계 PI 전류제어기

풀부하 동작에서 모든 부위가 100℃ 이하로 관리될 수 있는 것으로 분석하였다.

### 3. IPMSM 벡터제어를 위한 동기좌표 전류제어

속도제어 또는 토크 제어를 하는 IPMSM 구동에 있어서 출력 토크 제어의 동특성은 전동기 구동 시스템의 성능을 결정하는데 가장 중요한 역할을 하게 된다. 그림 12에서와 같이 전류 제어기는 IPMSM 제어 시스템에서 가장 내부에 위치하게 되어 토크 제어에 가장 큰 영향을 주게 된다. 그 이유는 IPMSM의 출력 토크는 전류에 대한 함수로 나타나기 때문이다. 간단한 R-L 부하에 대해서 가장 널리 쓰이는 동기좌표계 PI 전류 제어기를 DSP를 활용하여 구현하였다.

회전자 기준 동기좌표계에서는 정상 상태에서 각종 물리량이 직류(DC) 성분으로 보이게 되므로 회전자 기준 동기좌표계에서 PI 제어기를 사용하면 계단 입력에 대하여 지령 값과 실제 값 사이의 정상 상태 오차를 없앨 수 있다. 아래 수식 (8)은 회전자 기준 동기좌표계에서 모터의 역기전력을 고려하여 d축과 q축에 대한 전류 변화량을 구하는 수식이며 이를 통해 3상 R-L부하에 대한 전달함수 및 pole과 zero를 구할 수 있다. 하지만,

$$s \begin{bmatrix} I_{ds}^r \\ I_{qs}^r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ \frac{1}{L} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{ds}^r \\ V_{qs}^r \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} 0 & R \\ R & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{ds}^r \\ I_{qs}^r \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -\omega_r & 0 \\ 0 & \omega_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{ds}^r \\ I_{qs}^r \end{bmatrix} \quad (8)$$

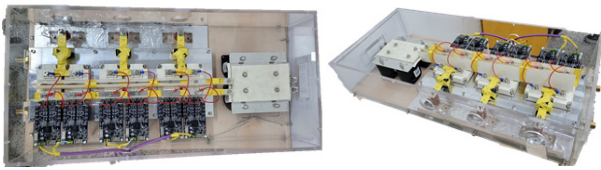


Fig. 14. Picture of traction motor driver prototype.  
그림 14. 구동모터 드라이버 축소시작품 사진

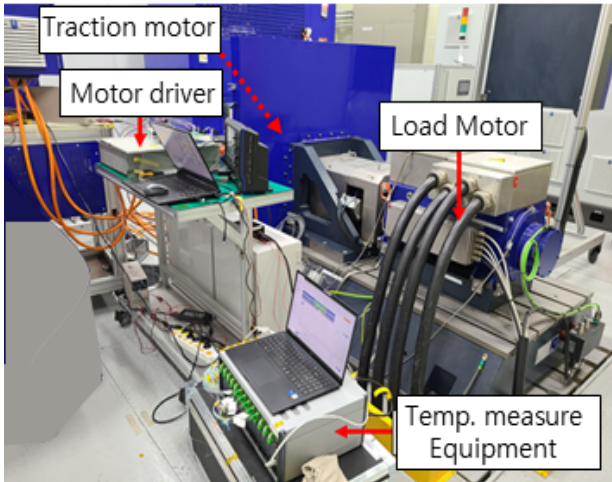


Fig. 15. Configuration of experimental environment.  
그림 15. 실험환경 구성도

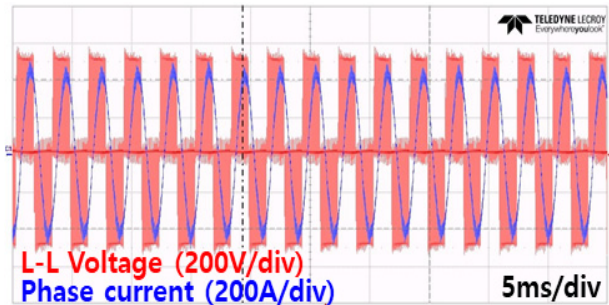


Fig. 16. Experimental waveform of traction motor driver.  
그림 16. 구동모터 드라이버 실험파형

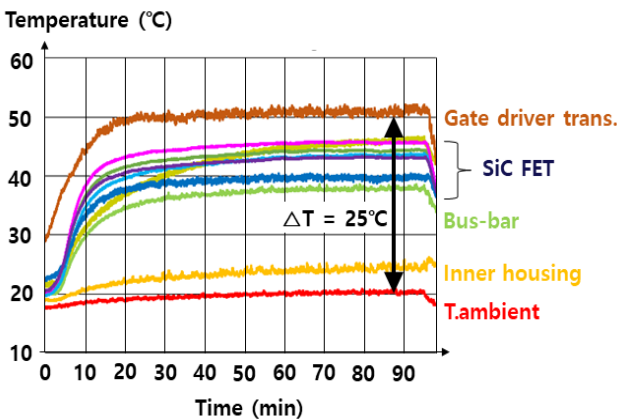


Fig. 17. Measured temperature of traction motor driver.  
그림 17. 구동모터 드라이버 측정온도

동기좌표계 PI 전류제어기는 속도가 증가함에 따라 극점과 영점이 소거(pole-zero cancellation)되지 않아 점점 불안정해지게 되는 단점이 있다. 이를 극복하기 위해 그림 13과 같이 역기전력 항을 보상하는 동기좌표계 PI 전류 제어기를 적용하였다.

#### 4. 실험 결과

SiC 기반 전기차 구동용 모터드라이버의 설계 및 분석에 대한 검증을 위해 그림 14와 같이 25kW 축소 시작품을 제작하였다. SiC 하프브릿지 모듈을 각 상에 2개 병렬로 연결하여 수냉식 방열판 위에 구성하였다. 축소 시작품 전체 크기는 770mm×350mm×150mm이며 디지털제어기는 TI사의 TMS320F28335F를 활용하여 축소시작품을 제어하도록 하였다. 본문에서 200kW급 구동용 모터 드라이버의 설계 및 분석을 진행하였으나 방사노이즈 영향으로 실험이 불가하여 축소시작품으로 대체진행 하였다. 추후 방사 노이즈개선 이후 200kW급 시작품으로 시험 진행하고자 한다.

그림 15는 실험환경 셋팅 사진이며 구동모터 드라이버와, 모니터링용 PC와 온도 계측장비, 부하모터(다이내미터), 구동모터로 구성되어 있다. 실험환경의 다이내미터는 최대출력/최대토크/최고속도 사양이 각각 200kW, 600Nm, 16,000rpm의 사양을 가지며, -50~180°C의 환경 챔버 구성이 가능해서 다양한 모터 및 모터드라이버의 성능 및 신뢰성 시험이 가능하다. 그림 16은 축소 시작품의 실험파형이다. 4500 rpm, 53Nm에서 선간전압과 상전류의 파형을 측정된 것이다. 그림 17은 구동모터 드라이버를 상온에서 약 100분 동안 동작시키면서 온도를 모니터링 하였다. SiC 전력반도체를 구동시키기 위한 게이트드라이버의 트랜스 온도가 50도로 가장 높게 측정되었으며 SiC 전력반도체 온도는 약 45도이고 온도 변화량은( $\Delta T$ ) 25도로 측정되었다. 표 4는 축소시작품의 효율을 정리한 것이다. 출력과 토크가 25.5kW, 52.8Nm에서 98.00%를 달성하였다. 기존 전력반도체로서 IGBT (FF600R12ME4, Infineon社)를 동일 조건에서 실험한 결과 94.63%를 나왔다. 구동모터 드라이버에 SiC를 적용하여 기존 IGBT대비 고효율을 달성하였으며 축소 시작품을 통해 성능 및 신뢰성을 검증하였다.

#### III. 결론

본 논문에서는 현재 출시되어 있는 전기차의 구동모터 사양을 조사를 하였으며 구동모터 사양을 대부분 포괄하

Table 4. Efficiency of SiC based traction motor driver shrink prototype.

표 4. SiC기반 모터드라이버 축소시작품 효율

Power (kW)	Torque (Nm)	Efficiency (%)
3.5	9.6	94.16
7	20.5	96.33
10.5	31.7	96.87
14	42.4	97.22
17.5	52.6	97.44
21	52.1	97.79
25.5	52.8	98.00

기 위해 200kW급 구동용 모터드라이버를 개발하였다. 고효율·고전력밀도를 달성하기 위해 기존에 적용되어진 IGBT 대신에 SiC를 적용하였으며, SiC를 최적 조건으로 활용하기 위해 예상되는 효율 및 방열특성 분석 등 하드웨어 분석을 진행하였다. 또한 IPMSM의 벡터제어를 위한 동기좌표계 PI전류제어기를 DSP를 활용하여 구현하였다. 축소시작품을 통해 성능 및 신뢰성을 검증하였고 SiC 전력반도체를 적용함으로써 98%의 고효율을 달성하였다.

## References

[1] F. Blaabjerg, H. Wang, I. Vernica, B. Liu and P. Davari, "Reliability of Power Electronic Systems for EV/HEV Applications," *in Proceedings of the IEEE*, vol.109, no.6, pp.1060-1076, 2021. DOI: 10.1109/JPROC.2020.3031041.

[2] Y. Y. Choi, E. S. Han, C. S. Lee, "Development Process and Technology Trend of Permanent Magnet Motor System for Electric Vehicle," *in Journal of the Korean. mag. society*, vol.31, no.3, pp.97-108, 2021.

[3] U.S. DRIVE DoE, "Electrical and electronics technical team roadmap," 2017.

[4] H. J. Kim, J. Y. Park, S. J. Kim, R. M. Hakim, H. K. Phuc, S. W. Choi, "A 11 kW 5.58 kW/L Electrolytic Capacitor-less EV Charger With Single- and Three-Phase Compatibility," *in Trans. Korean Inst. Power Electron*, vol.26, no.4, pp.277-284, 2021. DOI: 10.6113/TKPE.2021.26.4.277

[5] ROHM semiconductor, "SiC Application Note :

SiC Power Devices and Modules," *ROHM semiconductor*, Application Note 14103EBY01, 2014.

[6] M. Chinthavali, P. Otaduy, and B. Ozpineci, "Comparison of Si and SiC inverters for IPM traction drive," *in Proc. IEEE Energy Convers. Congr. Expo.*, pp.3360-3365, 2010. DOI: 10.1109/ECCE.2010.5618319

[7] S. Jahdi, O. Alatisse, C. Fisher, L. Ran, and P. Mawby, "An evaluation of silicon carbide unipolar technologies for electric vehicle drive-trains," *IEEE J. Emerg. Sel. Topics Power Electron.*, vol.2, no.3, pp.517-528, 2014. DOI: 10.1109/JESTPE.2014.2307492

[8] A. M. S. Al-bayati, S. S. Alharbi, S. S. Alharbi and M. Matin, "A comparative design and performance study of a non-isolated DC-DC buck converter based on Si-MOSFET/Si-Diode, SiC-JFET/SiC-schottky diode, and GaN-transist or/SiC-Schottky diode power devices," *2017 North American Power Symposium (NAPS)*, pp.1-6, 2017. DOI: 10.1109/NAPS.2017.8107192.

[9] X. Liu, H. Chen, J. Zhao and A. Belahcen, "Research on the Performances and Parameters of Interior PMSM Used for Electric Vehicles," *in IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol.63, no.6, pp.3533-3545, 2016. DOI: 10.1109/TIE.2016.2524415.

[10] A. Chiba et al., "Torque Density and Efficiency Improvements of a Switched Reluctance Motor Without Rare-Earth Material for Hybrid Vehicles," *in IEEE Transactions on Industry Applications*, vol.47, no.3, pp.1240-1246, 2011. DOI: 10.1109/TIA.2011.2125770.

[11] S. Kim and J. -K. Seok, "Wide-speed direct torque and flux control of torque-controlled IPMSM drives," *2012 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE)*, pp.3993-3999, 2012. DOI: 10.1109/ECCE.2012.6342157.

[12] K. C. Kim, "Trend and Issue of Traction Motor Technology for Electric Vehicle," *Auto Journal*, 2017.

[13] Z. Yang, F. Shang, I. P. Brown and M. Krishnamurthy, "Comparative Study of Interior



Permanent Magnet, Induction, and Switched Reluctance Motor Drives for EV and HEV Applications,” in *IEEE Transactions on Transportation Electrification*, vol.1, no.3, pp.245-254, 2015.

DOI: 10.1109/TTE.2015.2470092.

[14] J. W. Park, D. H. Koo, J. M. Kim, H. G. Kim, “Development of a Interior Permanent Magnet Synchronous Motor and Driver for 2-Motor Driven Electric Vehicle,” *Power electronics annual conference*, pp.305-308, 1998.

DOI: 10.1109/PEDES.1998.1330720

[15] G. Berardi, S. Nategh, N. Bianchi and Y. Thioliere, “A Comparison Between Random and Hairpin Winding in E-mobility Applications,” *IECON 2020 The 46th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*, pp.815-820, 2020. DOI: 10.1109/IECON43393.2020.9255269.

[16] CASCADIA MOTION, “SS-250 Gen2 Single stack datasheet,” 2022. <https://cascadiamotion.com/productlist/15-motors/10-cm-motors/8-ss-250>

[17] N. S. Bristy, S. Mustary, R. Hasan and A. Das, “Minority carrier lifetime dependence into switching power loss calculation of IGBT,” *2017 International Conference on Electrical, Computer and Communication Engineering (ECCE)*, pp.79-82, 2017. DOI: 10.1109/ECACE.2017.7912883.

[18] Y. Takatsuka, H. Hara, K. Yamada, A. Maemura and T. Kume, “A wide speed range high efficiency EV drive system using winding changeover technique and SiC devices,” *2014 International Power Electronics Conference (IPEC-Hiroshima 2014 - ECCE ASIA)*, pp.1898-1903, 2014.

DOI: 10.1109/IPEC.2014.6869844.

[19] ROHM semiconductor, “SiC Power Devices and Modules Application Note,” 2013.

[20] Y. Wu, S. Yin, H. Li, M. Dong, “Modeling and Experimental Investigation of Electromagnetic Interference (EMI) for SiC-Based Motor Drive,” *Energies (Multidisciplinary Digital Publishing Institute)*, Vol.13, No.19, pp.5173, 2020.

DOI: 10.3390/en13195173

[21] E. S. Glitz and M. Ordonez, “MOSFET Power Loss Estimation in LLC Resonant Converters: Time

Interval Analysis,” in *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol.34, no.12, pp.11964-11980, 2019.

DOI: 10.1109/TPEL.2019.2909903.

[22] F. L. Luo and H. Ye, “Small Signal Analysis of Energy Factor and Mathematical Modeling for Power DC-DC Converters,” in *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol.22, no.1, pp.69-79, 2007.

DOI: 10.1109/TPEL.2006.886652.

[23] A. Nisch, C. Kloeffer, J. Weigold, W. Wondrak, C. Schweikert and L. Beaurenaut, “Effects of a SiC T MOSFET Traction Inverters on the Electric Vehicle Drivetrain,” *PCIM Europe 2018: International Exhibition and Conference for Power Electronics, Intelligent Motion, Renewable Energy and Energy Management*, pp.1-8, 2018.

## BIOGRAPHY

### Yeonwoo Kim (Member)



2015 : BS degree in Electrical and Information Engineering, Seoul National University of Science & Technology.

2017 : MS degree in Electrical and Information Engineering, Seoul National University of Science & Technology.

2018~2020 : Research Engineer, LG Ensol group

2020~Present : Researcher, Korea Institute of Machinery and Materials.

### Sehwan Kim (Member)



2011 : BS degree in Electrical Engineering, Yeungnam University.

2016 : PhD. degree in Electrical Engineering, Yeungnam University.

2016~2018 : Research Engineer, POSCO group.

2018~2019 : Research Engineer, DoosanInfracore.

2019~Present : Senior Researcher, Korea Institute of Machinery and Materials.

**Minjae Kim** (Member)

2015 : BS degree in Mechanical Engineering, Gacheon University.  
2017 : MS degree in Mechanical Engineering, Gacheon University.  
2017~2018 : Research Engineer, Kapec Valeo.

2018~Present : Engineer, Korea Institute of Machinery and Materials.

**Uihyung Yi** (Member)

2013 : BS degree in Mechanical Car Engineering, Gachon University.  
2015 : MS degree in Mechanical Engineering, Gachon University.  
2013~2018 : Researcher, Environmental Systems Research Division, Korea Institute of Machinery and Materials.

**Sungwon Lee** (Member)

2009 : BS degree in Mechanical Engineering, Kongju University.  
2011 : MS degree in Mechanical Engineering, Kongju University  
2011~2016 : Research Engineer, Korea Institute of Machinery and Materials.

2016~2017 : APPL Engineer, AVL

2017~Present : Senior Engineer, Korea Institute of Machinery and Materials.