

150kW급 수소연료전지 차량용 DC/DC 컨버터 개발 및 실차모사 실험

김선주¹, 정현주¹, 최세완[†], 조준호², 전유종², 박준성², 윤혜성³

Development of DC/DC Converters and Actual Vehicle Simulation Experiment for 150 kW Class Fuel-cell Electric Vehicle

Sun-Ju Kim¹, Hyeonju Jeong¹, Sewan Choi[†], Jun-Ho Cho², Yujong Jeon²,
Jun-Sung Park², and Hye-Sung Yoon³

Abstract

This paper proposes a power system that includes a 120k W fuel cell DC - DC converter (FDC) and 30 kW bidirectional DC - DC converter (BHDC) for a 150 kW fuel-cell vehicle. With a high DC link voltage of 800 V, the efficiency and power density of the power electronic components are improved. Through the modular design of FDC and BHDC, electric components are shared, resulting in reduced mass production costs. The switching frequency of 30 kHz of full SiC devices and optimal design of coupled inductor reduce the volume, achieving a power density of 8.3 kW/L. Furthermore, a synergetic operation strategy using variable limiter control of FDC and BHDC was proposed to efficiently operate the fuel cell vehicle considering the fuel cell stack efficiency according to the load. Finally, the performance of the prototype was verified by Highway Fuel Economy Driving Schedule testing, EMI test, and the linked operation between FDC and BHDC. The full load efficiencies of the FDC and BHDC prototypes are 98.47% and 98.74%, respectively.

Key words: FCEV, Boost converter, FDC, BHDC, Coupled inductor, Interleaved, Bi-directional

1. 서 론

최근 친환경 자동차로 각광받고 있는 연료전지 자동차(Fuel cell electric vehicle, FCEV)는 오염물질의 배출이 없고, 짧은 급유시간으로 장거리 주행이 가능하다는 장점이 있다. 일반적인 FCEV의 전력 시스템^{[1]-[3]}은 그림 1과 같이 구성되며, 전력을 공급하기 위한 연료전지(Fuel Cell, FC)스택과 전력관리를 통해 회생에너지를 흡수하고 고효율 영역에서 연료전지 스택을 운영하기

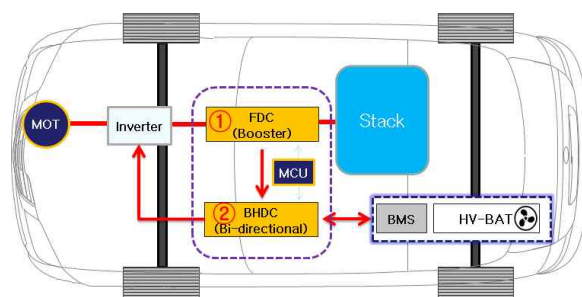


Fig. 1. Fuel cell electric vehicle system.

위한 고전압 배터리(Battery)가 보조 전원으로 사용된다. 이를 위한 전력변환 장치로서 연료전지용 DC-DC 컨버터(Fuel cell DC-DC Converter, FDC)와 양방향 DC-DC 컨버터(Bidirectional High-voltage DC-DC Converter, BHDC)가 있다.

연료전지 차량의 가격을 낮추기 위해 전체 차량 가격의 60%를 차지하는 연료전지 스택의 셀 수를 줄이고 승압형 FDC를 사용하는 방식이 선호되고 있다^[4]. 일례로 Toyota의 2014년형 1세대 Mirai의 연료전지 스택의

Paper number: TKPE-2022-27-1-4

Print ISSN: 1229-2214 Online ISSN: 2288-6281

[†] Corresponding author: schoi@seoultech.ac.kr, Dept. of Electrical & Information Engineering, Seoul National University of Science and Technology, Korea
Tel: +82-2-970-6542 Fax: +82-2-972-2866

¹ Dept. of Electrical & Information Engineering, Seoul National University of Science and Technology, Korea

² Electric Drive Research Center, Korea Automotive Technology Institute, Korea

³ Power Research Lab., Younghwa Tech. Co., Korea
Manuscript received Nov. 15, 2021; revised Nov. 16, 2021; accepted Nov. 17, 2021

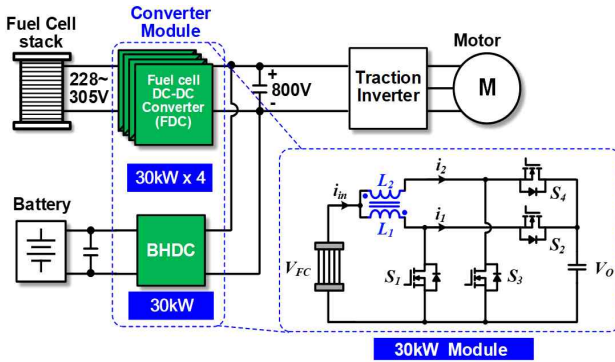


Fig. 2. Proposed power system for 150 kW FCEV.

경우 2008년형 대비 30장의 연료전지 셀을 저장하고 FDC를 사용하는 방식으로 전체 차량 가격의 10%를 저감하였다^{[10],[11]}. Mirai^[2]의 FDC는 114kW급으로 4상 인터리브드 부스트컨버터 토폴로지에 최대 DC 링크 전압은 650V이다. Si IGBT 파워 모듈을 사용하여 8.7kW/L의 전력밀도를 달성하였다. 또한, Honda의 2016년식 연료전지 자동차 Clarity^[3]의 FDC는 100kW급으로 커플드 인덕터(Coupled inductor)를 적용한 4상 인터리브드 부스트컨버터이다. DC 링크 전압은 500V이며 스위치와 다이오드에 Full SiC 모듈을 사용하였고 전력밀도는 6.33kW/L 이다.

이외의 FDC를 사용한 장점으로 인버터의 입력전압을 높임으로써 인버터와 모터 등 전류가 감소되어 효율상승이 가능하게 될 뿐만 아니라, 전력전자 부품의 부피 및 중량 저감이 가능하게 된다. 또한, 부하에 따라 링크 전압 가변이 가능하여 인버터와 모터의 최적 효율 제어가 가능하게 된다. 하지만 연료전지의 응답특성이 늦어 차량의 부하가 급변하는 경우 DC 링크 전압의 안정화를 위하여는 FDC와 함께 BHDC를 사용한다. BHDC는 모터부하의 변동에 의한 과도부하를 공급하거나 모터로부터의 회생에너지를 배터리에 충전하는 역할을 한다. 또한 FDC와의 연계동작으로 연료전지를 안정적이고 효율적으로 사용할 수 있게 함으로써 전체 차량의 효율상승과 연료전지의 수명증대가 가능하다.

본 논문에서는 1200V Full SiC를 적용한 연료전지 차량용 120kW급 FDC와 30kW급 BHDC를 제안한다. 인버터와 모터의 효율상승과 부피저감을 위하여 최대 DC 링크 전압을 800V로 높였으며, 양산가 저감을 위해 FDC 파워스택을 30kW 4개의 모듈형으로 하여 병렬 제어^[5]를 적용하고 BHDC 파워스택은 FDC의 모듈과 동일한 것으로 하여 파워스택과 부품을 공용화하였다.

또한, 파워스택의 부피를 좌우하는 입력 필터 인덕터의 부피저감을 위한 커플드 인덕터^{[6],[7]}의 설계와 연료전지의 부하에 따른 효율 특성을 고려한 FDC와 BHDC의 연계운전전략(Synergetic operation strategy)을 제시하였고, 실차 적용을 위한 실차모사 시험과 EMI 테스트를 진행하였다. 제작된 최종 120kW급 FDC와 30kW급

TABLE I
COMPARISON OF COUPLING METHOD FOR COUPLED INDUCTOR

Items	Direct Coupling	Inverse Coupling
Equivalent circuit		
Magnetic flux		
Current Waveform ($k = 1$)		
Characteristics	- High DC current offset - Low input current ripple	- Low DC current offset - High input current ripple

BHDC는 각각 8.3kW/L, 7.95kW/L의 전력밀도와 98.47%, 98.74%의 정격효율을 달성하였다.

2. 제안하는 DC/DC 컨버터 시스템

제안하는 연료전지 자동차의 전력시스템 구성은 그림 2와 같다. 연료전지 측의 전류 리플을 저감하기 위해서 각 컨버터 모듈은 스위칭주파수 30kHz의 커플드 2상 인터리빙(Interleaving) 방식을 적용하여 필요 인덕턴스와 DC offset을 작게하여 자성체의 부피를 저감하였다. 각 스위치는 1200V Full SiC Mosfet를 동기정류시켜 대전류에서 손실을 최소화하였다.

각 모듈의 정격 파워는 30kW로 FDC의 경우 4개의 모듈로 구성되어 최대 120kW, BHDC의 경우 30kW로 단일 모듈로 구성된다. FDC와 BHDC 컨버터 회로 및 부품 공용화를 통해 양산제작 시 가격을 절감할 수 있으며, 소자 부품이 모두 동일하여 FDC와 BHDC의 연계 운전^[8]에서도 모듈 간 오차가 없어 BHDC와 FDC 및 각 모듈 간의 불균형이 거의 발생하지 않는다.

2.1 커플드 인덕터 설계

2상 인터리빙 부스트 컨버터에 적용할 수 있는 두 가지 커플링 방식에 따른 특성을 표 1에 나타내었다. Direct coupling의 경우 각 인덕터의 방향이 동일하며, 회로도의 L_1 과 L_2 측에 전압이 인가될 경우 도면의 코어와 같이 내부자속이 같은 방향으로 흘러 DC offset 전류가 높으나, i_1 과 i_2 의 합인 입력전류의 리플은 180도 위상차로 인해 작다. Inverse coupling의 경우 Direct

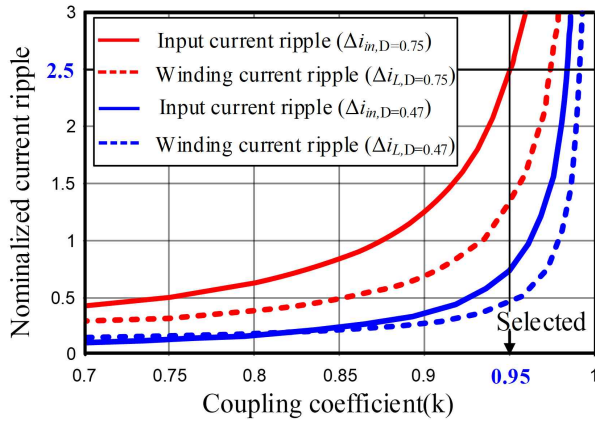


Fig. 3. Selection of optimal coupling coefficient considering allowable fuel cell current ripple.

coupling과 반대로 코어 내부자속이 서로 상쇄되어 코어의 부피가 작으나 입력전류의 리플은 높은 특성을 가진다.

연료전지 시스템의 경우, 입력측에 DC 전류가 매우 커서 코어의 부피를 좌우하므로 코어 부피 저감을 위해서 Inverse coupling이 보다 적합하다. 그러나 각 모듈의 입력전류의 리플이 증가하는 단점을 본 방식에서는 4개 모듈의 인터리빙 동작을 통해 연료전지 측에서의 전류 리플을 저감하였다.

커패시터 인덕터의 부피저감을 위해 결합계수 k 의 최적 설계가 매우 중요하다. 인덕터 전류리플(i_L)은 식 (1)에 의해 결정되며 입력 전류리플(i_m)은 식 (2)에 의해 결정된다^[9].

$$\begin{cases} \Delta i_L = \frac{V_o(1-D-Dk)D}{L(1-k^2)f_s} \{D \leq 0.5\} \\ \Delta i_L = \frac{-V_o(k-D-Dk)(1-D)}{L(1-k^2)f_s} \{D > 0.5\} \end{cases} \quad (1)$$

$$\begin{cases} \Delta i_m = \frac{V_o(1-2D)D}{L(1-k)f_s} \{D \leq 0.5\} \\ \Delta i_m = \frac{V_o(2D-1)(1-D)}{L(1-k)f_s} \{D > 0.5\} \end{cases} \quad (2)$$

주파수(f_s), 듀티(D), 출력전압(V_o)은 주어진 사양에 의해 정해지고 인덕턴스와 k 에 의해 전류 리플이 정해진다. 본 설계 사양에서 필요한 듀티 범위는 0.47 - 0.76이며, 그림 3에 듀티 범위 내 각 전류 리플을 그래프로 나타냈다. 높은 결합계수일 경우 낮은 인덕턴스가 요구되지만 그림 3과 같이 결합계수가 0.96 이상에서 전류 리플이 급격하게 증가하는 것을 확인할 수 있다. 따라서 목표 리플 범위 내인 0.95로 k 값을 선정하였으며, 선정된 k 값을 기준으로 위의 식 (1)과 (2)를 통해 인덕턴스를 설계하였다. 설계된 인덕턴스의 자기인덕턴스는 185 μ H, 상호인덕턴스는 125 μ H로 방열을 위해 U타입 코어를 커스터마이징(Customizing)하여 제작하였다.

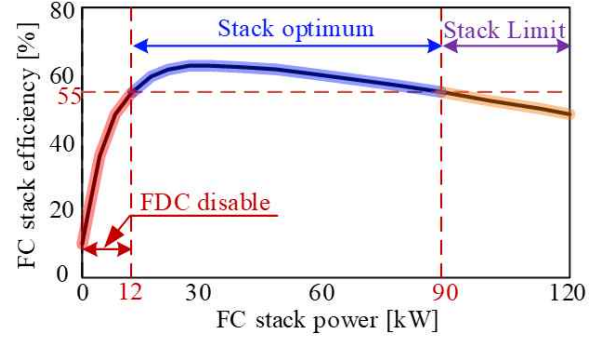


Fig. 4. Fuel cell efficiency according to fuel cell power.

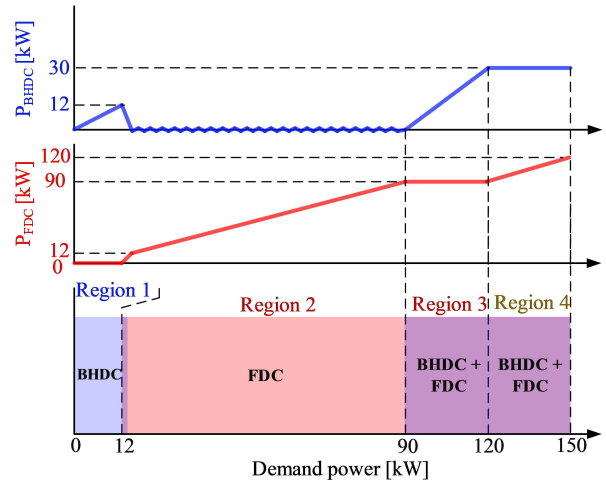


Fig. 5. Proposed synergetic operation strategy.

2.2 FDC와 BHDC 병렬 및 연계운전

FDC의 경우 4개의 모듈로 구성되어 있어 부하 상황에 따른 Phase-shedding과 병렬제어기법을 구현하였다. 본 논문에서는 BHDC가 FDC의 1개 모듈과 동일한 구성이기 때문에 FDC 내부의 병렬운전뿐만 아니라 BHDC와의 연계운전 전략을 제안하였다. 일반적으로 FDC와 BHDC가 별도로 구성된 연료전지 차량에서는 응답 성능이 빠른 BHDC에서 인버터측 링크 전압을 안정적으로 제어하며, 상대적으로 응답 성능이 느린 FDC 측에서 연료전지의 파워를 제어하는 방식을 사용한다.

연료전지스택은 일반적인 배터리 특성과 달리 부하에 따라 연료전지 전압과 스택의 효율이 변동한다. 그림 4에 120kW 정격의 연료전지스택의 부하에 따른 효율을 나타내었다. 무부하에서 정격의 10% 구간인 12kW까지의 효율은 낮지만 부하가 증가함에 따라 효율이 증가하여 30kW의 효율이 가장 높으며, 이후 효율이 서서히 감소하는 특성을 보인다. 따라서 12 - 90kW에서 최적의 효율 성능을 보이므로 FDC의 주 동작영역을 이 범위로 설정하여 FDC와 DC 링크를 통하여 연결된 BHDC와의 전력을 분담하는 연계운전을 진행하였다. 그림 5는 제안하는 부하에 따른 연계운전 전략을 4가지 모드로 나타내며 그림 6은 각 모드에 따른 FDC와 BHDC의 제어기

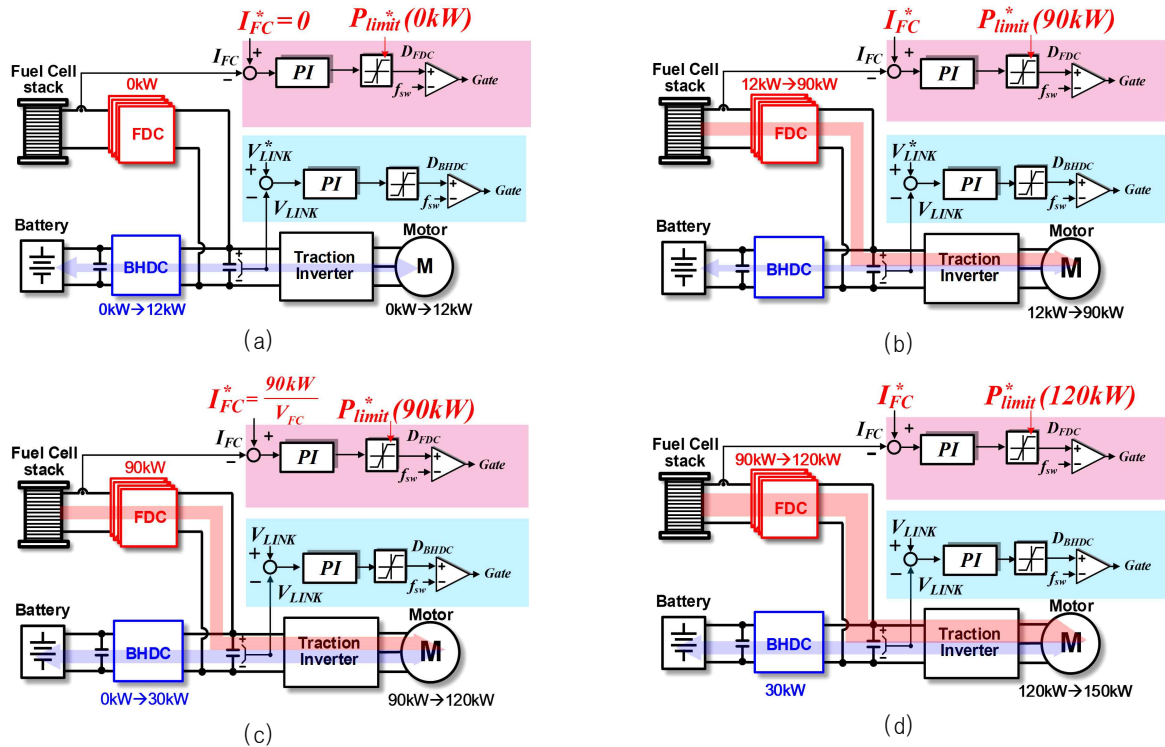


Fig. 6. Synergetic operation modes of FDC and BHDC. (a) Region 1, (b) Region 2, (c) Region 3, (d) Region 4.

와 전력흐름을 도식화하였다. 기본적으로 응답특성이 빠른 배터리와 연결된 BHDC는 모터의 급속한 부하변동 및 회생에너지의 배터리 충전을 위해 DC 링크 전압을 제어하고, 응답특성이 느지만 주요 동력인 FDC측에서 평균전력을 공급한다.

Region 1 (0 - 12kW): 연료전지의 효율특성이 가장 낮은 저부하 영역으로 연료전지의 기동이 이루어진다. FDC로부터의 전력의 지령은 0으로 하고 BHDC의 DC 링크 전압제어에 의한 단독운전을 통해 배터리의 전력만으로 인버터를 구동한다.

Region 2 (12 - 90kW): 연료전지의 주 동작영역으로 이 구간에서는 FDC가 전류제어를 통해 평균전력을 공급하며, BHDC의 경우 모터측의 과도적 부하변동과 회생에너지의 배터리 충전을 위하여 링크측 전압을 제어한다.

Region 3 (90 - 120kW): 연료전지 출력이 90kW 이상에서는 효율이 감소하므로 연료전지의 최적 효율을 유지하기 위해 FDC의 출력을 90kW로 고정시키고 BHDC에서 나머지 부하전력을 공급하는 모드이며 BHDC가 30kW까지 공급하는 경우 시스템에서 최대 120kW까지 전력을 공급하게 된다.

Region 4 (120 - 150kW): 모터에서 120kW 이상의 부하가 요구되는 경우 BHDC는 30kW 정격으로 설계가 되어있으므로 BHDC의 출력전력을 30kW로 제한하면서



Fig. 7. 120 kW FDC prototype.



Fig. 8. 30 kW BHDC prototype.

DC 링크 전압제어를 수행하고 추가의 전력은 FDC에서 공급하기 위하여 FDC 출력전력을 120kW 정격까지 사용한다. 이때 BHDC와 FDC 출력 전력을 합하여 최대 150kW까지 공급할 수 있다.

3. 제작 및 실험

제작된 120kW FDC와 30kW BHDC 시작품을 각각 그림 7과 그림 8에 나타내었다. FDC의 경우 30kW 모듈 4개 병렬로 구성되며 방열판을 중심으로 2개의 모듈

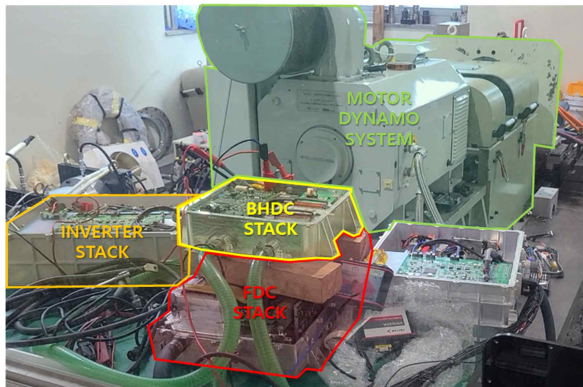


Fig. 9. Vehicle simulation test environment.

TABLE II
SYSTEM PARAMETERS OF FDC & BHDC

Item	Value
Switches	FF11MR12W1M1_B11 (1200 V, 100 A, Infineon)
Inductor	Self inductance: 185 μ H Mutual inductance: 125 μ H (Customized Mega-flux 60 u, Changsung UK7965B)
Capacitor	P246L70605JA (700 V, 6.5 μ F, pilkor)

FDC Specification

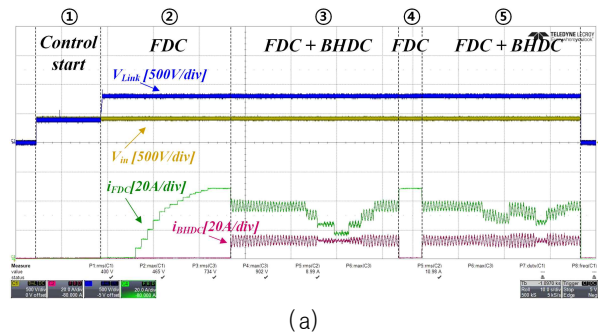
- P_o : 116.59 kW
- V_{in} : 195 - 425 V
- V_{Link} : 831 V
- Weight: 17.51 kg
- Volume: 14 L
- Power density: 8.3 kW/L

BHDC Specification

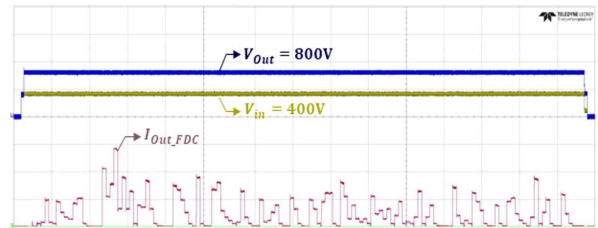
- P_o : 38.04 kW
- V_{in} : 200 - 425V
- V_{Link} : 800 V
- Weight: 6.85 kg
- Volume: 4.85 L
- Power density: 7.95 kW/L

씩 양쪽에 배치하였으며, BHDC의 경우 FDC의 모듈과 동일한 파워스택의 30kW로 단일 모듈로 구성하였다.

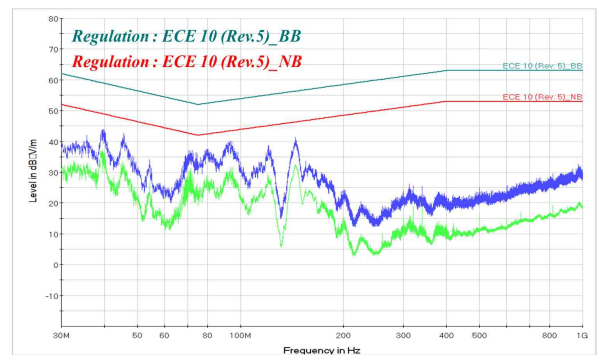
그림 9는 FDC, BHDC 연계구성 및 실차모사 테스트 환경 사진이며, 구성으로는 DC 소스측에 BHDC와 FDC가 같이 연결되며, 출력측에 모터 동작을 위한 모터 다이내모 시스템과 스택과 모터 사이에 인버터가 연결되어 있다. 본 논문에서 제안하는 FDC와 BHDC의 주요 성능은 아래와 같다. 그림 10은 제품의 주요 파형들을 나타내며, 10(a)는 FDC와 BHDC의 연계운전 파형으로 FDC 및 BHDC의 입출력 전압과 전류파형을 나타내었으며, 각 모드에 따라 FDC 단독제어와 FDC, BHDC 연계운전 및 부하변동 동작을 확인할 수 있다. 10(b)는 실차 기반 성능시험으로 시험용 HFEDS(Highway Fuel Economy Driving Schedule) 프로파일을 산출 후 1주기 동작 파형이며 이때, FDC 효율을 측정하여 평균 효율은 86%, 최대효율은 97%를 달성하였다. 10(c)는 자동차 실차 및 전장품을 대상으로 한 전자파 유럽 법규인 “ECE Regulation No. 10” 내 “Radiated narrowband/broadband



(a)



(b)



(c)

Fig. 10 Experimental results ($V_{in} = 400$ V, $V_{Link} = 800$ V). (a) Synergetic operation waveform, (b) HFEDS test waveform, (c) EMI analysis waveform.

Fig. 11. Measured efficiency at full load.

electromagnetic emissions from ESAs” 항목에 대한 평가 그래프로 전자파 흡수체 장착실(Absorber-lined Shielded Enclosure, ALSE법) 내에서 수신안테나(Hybrid antenna)와 EMI 수신기(ESU 26)를 활용하여 FDC/BHDC 통합 구동 시 발생하는 전자파 방출량을 측정하였다. 전원 입력 출력부에 필터설계 및 최적화를 진행한 결과, 전자파 법규에서 요구하는 Narrowband 및 Broadband 전자파 방출량 규제치를 각각 만족하였다. 그림 11은 FDC와 BHDC의 측정된 각 정격효율을 나타내었으며,

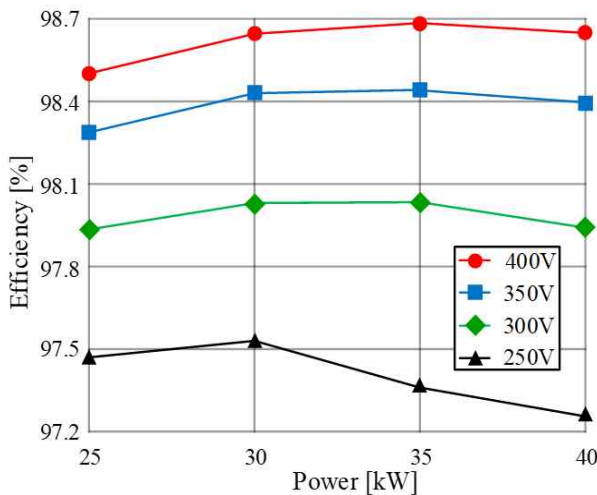


Fig. 12. Measured efficiency of a 40 kW module.



Fig. 13. Thermal test of switches in FDC.

Yokogawa社의 WT3000을 이용하여 측정하였다. FDC의 경우 98.47%, BHDC의 경우 98.74%의 효율을 달성하였다. 그림 12는 입력전압과 부하에 따른 40kW 모듈의 효율 그래프이며 입력전압 250V에서 최소 97.3%를 달성하여 주 동작영역 범위에서 고효율을 달성하였다. 그림 13은 120kW FDC 정격동작에서 각 모듈의 스위치 온도 측정 파형이다. 냉각수 25℃ 조건이며, 스위치 간의 온도 차이가 존재하나 평균적으로 35℃ 부근에서 안정화되었으며, 최대 온도는 40℃로 15℃의 ΔT 를 만족하였다.

4. 결 론

본 논문에서는 FDC와 BHDC를 포함하는 150kW급 연료전지 차량용 전력시스템을 제안한다. 제안한 시스템은 DC 링크 전압을 800V로 높여 기존의 시스템보다 더욱 높은 전력을 공급하고 인버터 및 모터 등 부품의

효율 및 중량 저감이 가능하게 되었다. 또한 FDC와 BHDC의 파워스택의 모듈화 설계를 통한 부품의 공용화로 양산가 절감을 꾀하였으며, Full SiC 소자의 30KHz 스위칭과 커플드 인덕터를 최적 설계를 통하여 수동소자 부피를 감소시켜 EMI 및 하우징 포함 8.3kW/L의 전력 밀도를 달성하였다. 또한 연료전지 부하에 따른 효율 특성을 고려하여 가변리미터 제어 기법을 적용한 FDC와 BHDC의 연계운전전략을 제안하였다.

120kW급 FDC와 30kW급 BHDC 시작품을 제작하여 기본 동작을 검증하였고 연계운전과 실차모사 시험 그리고 실차 기반 EMI 규격을 검증하였다. 제작된 시작품은 정격동작에서 FDC의 경우 98.47%, BHDC의 경우 98.74%의 효율을 달성하였으며 전 범위 동작에서도 최저 효율 97.3%를 달성하였다. 본 논문에서 제안하는 수소연료전지 차량용 컨버터는 현 제품을 상회하는 높은 성능과 제어방식으로 향후 사업화를 통해 국내의 시장을 개척해 향후 수소연료전지 차량에 적용할 예정이다.

본 연구는 산업통상자원부와 한국산업기술진흥원의 “수소연료전지차 부품실용화 및 산업기반육성사업”으로 수행된 연구 결과입니다. (과제번호: P0000270)

References

- [1] K. Jin, X. Ruan, M. Yang, and M. Xu, “Power management for fuel-cell power system cold start,” *IEEE Transactions on Power Electronics*, Vol. 24, No. 10, pp. 2391 - 2395, Oct. 2009.
- [2] Y. Hasuka, H. Sekine, K. Katano, and Y. Nonobe, “Development of boost converter for MIRAI,” SAE Technical Paper 2015-01-1170, 2015.
- [3] R. Kitamoto, S. Sato, H. Nakamura, and A. Amano, “Development of fuel cell boost converter using coupled-inductor for new FCV,” SAE Technical Paper 2017-01-1224, 2017.
- [4] O. Kreutzer, B. Eckardt, and M. März, “Unidirectional fast switching non-isolated 100 kW fuel cell boost converter,” in *2014 16th European Conference on Power Electronics and Applications, Lappeenranta*, pp. 1 - 10, 2014.
- [5] A. Costabeber, P. Mattavelli, and S. Saggini, “Digital time-optimal phase shedding in multiphase buck converters,” *IEEE Transactions on Power Electronics*, Vol. 25, No. 9, pp. 2242 - 2247, Sep. 2010.
- [6] A. Komatsuzaki and S. Hashino, “Development of high-power density DC-DC converter using coupled inductors for clarity plug-in hybrid,” SAE Technical Paper 2018-01-0458, 2018.
- [7] M. Hirakawa et al., “High power DC/DC converter using extreme closecoupled inductors aimed for electric

vehicles,” in *The 2010 International Power Electronics Conference (ECCE ASIA)*, Sapporo, pp. 2941 - 2948, 2010.

- [8] Y. Huangfu, L. Guo, R. Ma, and F. Gao, “An advanced robust noise suppression control of bidirectional DC - DC converter for fuel cell electric vehicle,” in *IEEE Transactions on Transportation Electrification*, Vol. 5, No. 4, pp. 1268 - 1278, Dec. 2019.
- [9] H. N. Tran, T. T. Le, H. Jeong, S. Kim, and S. Choi, “A 300 kHz, 63 kW/L ZVT DC-DC converter for 800-V fuel cell electric vehicles,” in *IEEE Transactions on Power Electronics*, Vol. 37, No. 3, pp. 2993 - 3006, Mar. 2022.
- [10] U.S. Department of Energy Hydrogen and Fuel Cells Program, “Record 17007: Fuel cell system cost - 2017,” 2017. [Online]. Available: http://www.hydrogen.energy.gov/program_records.html.
- [11] Toyota “2014 toyota Mirai FCEV brochure,” 2014. [Online]. Available: https://www.toyota-europe.com/download/cms/euen/Toyota%20Mirai%20FCV_Posters_LR_tc-m-11-564265.pdf.



김선주(金善宙)

1994년 3월 9일생. 2017년 서울과학기술대 전기정보공학과 졸업. 2019년 동 대학원 전기정보공학과 졸업(석사). 2019년~현재 동 대학원 전기정보공학과 박사과정.



정현주(鄭炫周)

1989년 6월 18일생. 2014년 단국대 전자전기공학부 졸업. 2016년 서울과학기술대 전기정보공학과 졸업(석사). 2021년 동 대학원 전기정보공학과 졸업(공학박). 2021년~현재 한화솔루션 시스템 R&D/운영 부문 시스템 개발센터 과장.



최세완(崔世琬)

1963년 3월 3일생. 1985년 인하대 전자공학과 졸업. 1992년 Texas A&M Univ. 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1995년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학박). 1985년~1990년 대우중공업 중앙연구소 대리. 1996년~1997년 삼성전기 종합연구소 수석연구원. 1997년~현재 서울과학기술대 전기정보공학과 교수. 당 학회 명예회장.



조준호(曹俊鎬)

1978년 12월 15일생. 2008년 경일대 전기공학과 졸업. 2008년 영남대 전기공학과 졸업(석사). 2008년~현재 한국자동차연구원 전기구동연구센터 책임연구원.



전유종(全裕宗)

1990년 6월 5일생. 2016년 공주대 제어계측공학과 졸업. 2016년~현재 한국자동차연구원 전기구동연구센터 연구원.



박준성(朴峻成)

1982년 4월 26일생. 2009년 서울과학기술대 제어계측공학과 졸업. 2011년 동 대학원 에너지환경대학원 신에너지공학과 졸업(석사). 2016년 동 대학원 신에너지공학과 졸업(공학박). 2015년~현재 한국자동차연구원 전기구동연구센터 책임연구원.



윤혜성(尹慧聖)

1979년 8월 20일생. 2005년 아주대 전기전자공학부 졸업. 2020년~현재 명지대 전기공학과 석사과정. 2014년~현재 영화테크 책임연구원.