

# 저전압 직류배전용 전력변환장치 기술

2050년까지 재생에너지 등을 통한 탄소 중립의 실현과 직류 전원을 가지는 디지털 부하의 등장으로 직류전원망의 필요성이 증대되고 있다. 저전압 직류배전 기술은 중전압 직류배전 또는 초고압 직류송전과 같은 보다 광위한 직류 전력망을 구축하기 위한 중요한 핵심 기술이다. 본 원고에서는 저전압 직류배전망 구축 및 운용에 필요한 저전압 직류배전용 전력변환장치에 대한 동향 및 기술을 소개하고자 한다.

## 1. 서론

멀티미디어 및 모바일 장비, LED 조명, IT 장비와 같은 전자 제품과 세탁기, 냉장고, 팬, 가열 / 냉각 시스템과 같은 전기모터를 채택하여 속도 제어와 에너지 효율성을 높이는 고효율 가전제품과 같은 직류를 전원으로 하는 새로운 디지털 부하가 매년 큰 폭으로 증가하고 있다. 또한, 2050년까지 재생에너지 등을 통한 탄소 중립 정책 추진 등으로 인한 전기 자동차 보급/확대 정책에 따라 전기차 시장이 급속히 성장하고, 이에 따라 충전 인프라 또한 급증할 것으로 예상된다. 이와 같은 직류 부하의 급속한 확대에 따른 기존 교류(AC, Alternating Current) 전원 공급 체계의 비효율성 증가는 새로운 직류(DC, Direct Current) 전원 체계의 필요성을 증대시키고 있다.

직류 전원 체계는 기존 교류 전원과 비교하면 다양한 장점이 있다. 예를 들어 직류는 교류와 달리 무효전력과 주파수가 없으며 사용자들이 우려하는 전자파의 영향이 적다. 또한, 신재생 같은 에너지원에 대해 에너지 변환 손실이 줄어들 수 있다. 이러한 새로운 직류 전원 체계는 발전소에서 전력을 변전소로 보내는 송전에서부터 거주지로 전력을 보내는 배전까지를 모두 포함하고 있으며 이를 통해 인프라 및 운영 비용 감소 등 경제적 이익을 달성하고 재생 가능 에너지원의 수용성을 확보할 수 있을 것으로 기대하고 있다.

최근 저전압 직류배전(LVDC, Low Voltage Direct Current)

전력기기의 향상된 기술 성능, 대폭적인 비용 절감 및 표준화 구축이 고도화됨에 따라 태양광 에너지 및 에너지저장장치(ESS, Energy Storage System)를 기반으로 하는 대규모 신재생발전소, 데이터 센터(IDC, Internet Data Center), 상업용 건물, 전기 철도, 전기선박 등 분야에서 저전압 직류배전 기술의 보급 및 상용화가 빠르게 진행되고 있다.

본 원고에서는 저전압 직류배전망 구축 및 운용에 필요한 저전압 직류배전용 전력변환장치에 대한 동향 및 기술을 소개하고자 한다.

## 2. 저전압 직류배전 전력변환장치 동향

국내외적으로 인버터, 컨버터, PCS(Power Conditioning System) 등 개별적인 전력변환장치 기술은 성숙하여 있으나, 이러한 저전압 직류배전에 적용되는 전력변환장치는 아직 미흡한 상태라고 할 수 있다.

태양광 시장의 경우, 확대를 통해 태양광 PCS의 제조업체 수가 증가하는 추세이나, 태양광과 연계되어 계통, 부하로만 전달하는 단방향 기술이 주를 이루고 있다. 최근에는 예비전력이나 잉여분을 ESS에 저장하는 양방향 PCS 연구가 활발히 진행되고 있으며 최근에는 전력변환장치의 성능 향상과

| 분야      | 2015년 | 2020년  | 2025년  |
|---------|-------|--------|--------|
| 데이터센터   | 62    | 237    | 551    |
| 통신 및 수송 | 6,330 | 16,590 | 32,440 |
| 산업용 빌딩  | 20    | 97     | 281    |
| 군사용     | 42    | 151    | 300    |
| 합계      | 6,454 | 17,075 | 33,572 |

그림 1 저전압 직류배전 국내시장 규모(억원)

전력 제어 기술의 성능개선을 위한 반도체 관련 산업과의 연계 개발도 함께 진행되고 있다. 한편 저전압 직류배전용 전력 변환장치 기술을 바탕으로 중전압 직류배전(MVDC, Medium Voltage Direct System) 및 초고압 직류송전(HVDC, High Voltage Direct System)과 관련된 전력변환장치로 기술 개발이 진행되고 있다.

DC 마이크로 그리드 시장을 중심으로 DC 배전에 대한 수요가 증가할 것으로 예상함에 따라 저전압 직류배전용 전력 변환장치, 특히 DC 배전 기술에 대한 경제적 필요성은 날로 증가하고 있다. 전 세계 DC 배전 시장은 2015년부터 2024년까지 약 6조 3백억 원의 시장규모를 형성할 것으로 예상하며, 연평균 7.1%의 성장률로 꾸준히 증가하는 추세를 보인다. 국내시장 역시 2015년 6,500억 원에서 2025년 3조 3,500억 원으로 증가할 것으로 전망된다. 그중 전력변환장치는 연평균 7.5%의 세계 성장률을 나타낼 것으로 보이며 국내 성장률은 15.2%로 예상된다.

### 3. 저전압 직류배전용 전력변환 장치 기술

저전압 직류배전 전력변환장치는 인터넷 비즈니스의 성장으로 인한 인터넷 데이터 센터, 재생에너지 발전설비의 확대와 에너지 저장장치의 증가에 따른 저전압 배전망 분야, 독립된 전원망과 효과적인 계통연계를 위한 직류/교류 혼합 배전망 분야, 전기차 보급에 따른 급속충전기 분야 등 다양한 분야에서 기술개발이 빠르게 이루어지고 있다. 본 절에서는 이러한 대표적인 저전압 직류배전용 활용 분야를 중심으로 전력변환장치의 기술 현황을 간략히 소개하고자 한다.

### 3.1 데이터 센터용 컨버터

최근 4차 산업혁명 시대에 발맞춰 인공지능(AI) 및 빅데이터(IoT, 5G)와 같은 디지털 기술의 수요가 급증함에 따라 이를 수용할 수 있는 데이터 센터 또는 서버 전원 공급장치 기술에 관한 관심이 증가하고 있다. 고신뢰성, 고전력 밀도, 고효율을 달성할 수 있는 전원 공급장치 개발을 위해서는 이를 구성하는 전력변환 장치 기술의 고도화가 필요하다.

#### 3.1.1 데이터 센터용 시스템 구성

그림 2 (a)는 기존 12V 기반의 데이터 센터 시스템 구성도를 나타낸다. 해당 구조에서 프로세서 및 메모리 장치는 12V 전원을 공급받으며, 계통 단의 경우 무정전 공급장치(UPS)를 추가로 설치하여 전력변환을 수행한다. 해당 시스템의 경우 낮은 DC-Bus 전압에 따른 높은 전류로 인해 전력 손실이 커서 높은 전력변환 효율을 달성하기 어렵다는 단점이 있다. 이에 반해 그림 2 (b)는 48V DC-Bus를 이용하여 시스템을 구성하였으며 별도의 UPS를 고려하지 않는 형태의 시스템을 구성하였다. 이를 통해 시스템의 전반적인 효율을 높이며 높은 전력 밀도를 달성할 수 있다<sup>[1]</sup>. 특히 이를 구현하기 위해서는 DC-DC 컨버터의 역할이 중요하며 이에 다양한 DC-DC 컨버터 토폴로지 모델이 제안되고 있다.

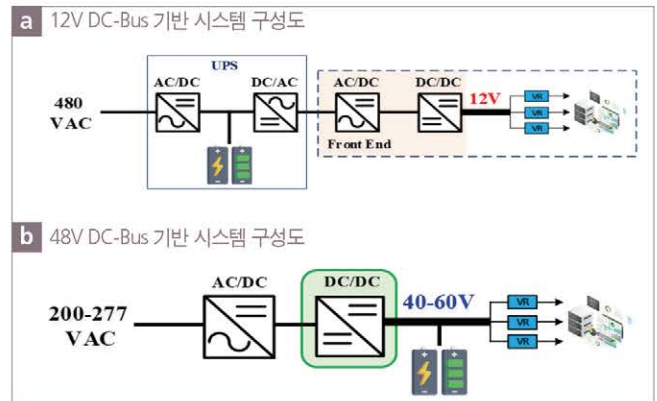


그림 2 데이터 센터용 시스템 구성도

#### 3.1.2 주요 DC/DC 토폴로지

그림 3은 데이터 센터용 DC/DC 토폴로지에 사용되는 대표적인 DC-DC 컨버터를 나타낸다. 그림 3 (a)는 기본적인 강압을 수행하는 벡 컨버터이며 그림 3 (b) 커패시터의 충, 방전을 이용하여 강압을 수행하는 Switched-Capacitor 컨버터이다. 언급한 컨버터의 경우 PWM 기반의 하드 스위칭을 수행하는 컨버터이므로 고주파수 대역 대에서의 높은 스위칭 손실로 인해 사용이 제한된다. 이에 그림 3 (c)와 같은 LLC 공진형 컨버터를 사용함에 따라 고주파수 대역 대에서도 고효율 및 고밀도를 달성할 수 있다<sup>[2]</sup>.

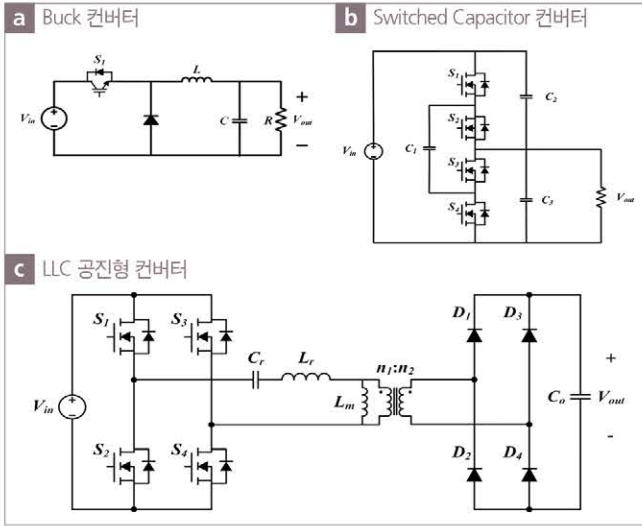


그림 3 데이터 센터용 DC/DC 컨버터 토폴로지

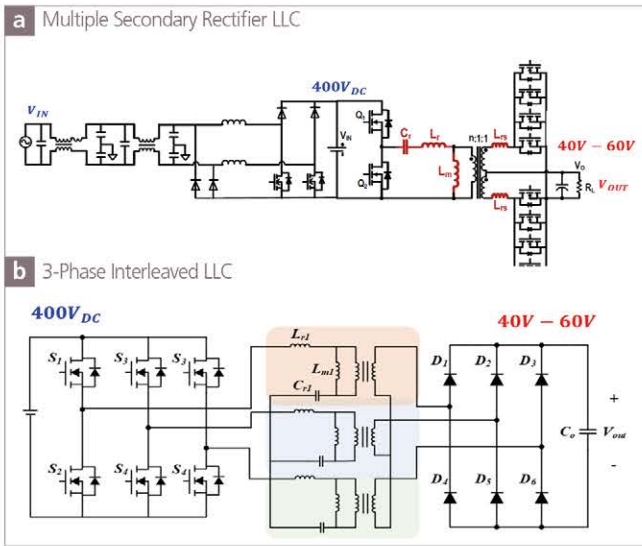


그림 4 데이터 센터용 LLC 공진형 컨버터 토폴로지 구조

데이터 센터용 시스템에 사용하는 LLC 공진형 컨버터의 경우 400[V]의 정류된 계통 전압을 48[V]의 DC 전압으로 강압하여 사용하기 위해 그림 4과 같은 토폴로지를 이용한다. 그림 4 (a)는 LLC 컨버터의 2차측을 여러 개의 병렬 스위치를 이용하여 고전류로 인한 전도손실을 저감하였으며 그림 4 (b)는 3상 LLC 컨버터를 이용하여 전도 손실 및 자성체 손실을 저감하여 고효율 달성을 달성할 수 있다<sup>[4]</sup>.

### 3.2 저전압 배전망용 정류기

저전압 배전망은 선로 비용 절감, 신재생 전원과의 쉬운 연계 및 전송 효율 증가 등의 이점을 가지기 때문에 신재생 에너지에 대한 관심이 증가하며 이에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. 이러한 직류 배전의 경우 계통의 380V 교류 입력 전압을 필요한 직류배전전압으로 변환하기 위한 전원 장치가 필요하다.

직류배전전압을 위해 싸이리스터 정류기, PFC 정류기, 2레벨 컨버터 구조의 정류기 등 여러 연구들이 진행되어왔다<sup>[1]</sup>. 이러한 시스템들은 입력단의 고조파 저감을 위해 큰 입력 인덕터 또는 높은 스위칭 주파수를 요구하게 된다. 때문에, 입력 고조파 절감에 매우 효과적이며 스위칭 주파수를 절감할 수 있는 3레벨 NPC 컨버터가 저전압 배전망용 정류기로 주목받고 있다.

#### 3.2.1 3레벨 NPC 정류기 토폴로지

그림 5는 저전압 배전망용 3레벨 NPC 정류기 시스템의 구성도이다. 계통과의 인터페이스를 위한 3레벨 NPC AC-DC 정류기의 출력 전압은 직렬로 연결된 2개의 커패시터에 의해 3단계로 분할된다. 두 출력 커패시터의 중간 지점이 중성점 N으로 정의되며 중성점은 기준으로 양극 전압과 음극 전압이 각각  $V_{O1}$ 과  $V_{O2}$ 로 정의한다.

3레벨 NPC 정류기는 380V 교류 입력 전압과 전류의 검출과 출력 전압과 전류의 검출을 기반으로 두 커패시터의 전압이 평형을 이루도록 제어되어 출력 전압을 형성하게 된다. 소비자들은 중성점을 기준으로  $\pm 750V$ 의 전압이 형성된 양극과 음극의 2-wire를 사용하여 1.5kV의 전압을 공급받게 된다.

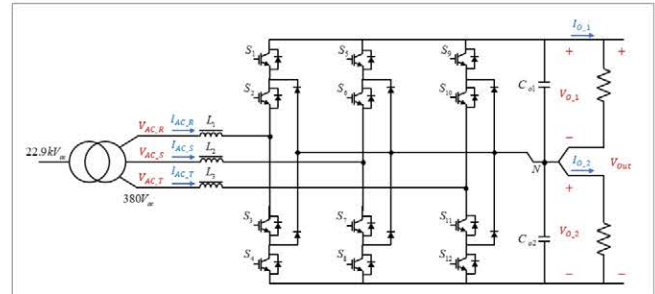


그림 5 3레벨 NPC 정류기 토폴로지

#### 3.2.2 전압 불평형 보상 제어 알고리즘

3레벨 NPC 컨버터는 구조적으로 스위칭과 부하의 변동에 의하여 중성점의 전위가 변동될 수 있는 단점을 갖는다. 중성점을 기준으로 부하의 차이가 발생할 경우 출력 전압의 불평형이 발생하기 때문에 이를 보상하기 위한 제어기를 그림 6에 나타낸다<sup>[2]</sup>.

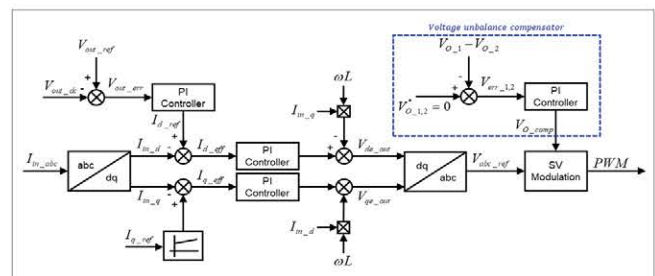


그림 6 3레벨 NPC 정류기 토폴로지

3상 PWM 방식에서 주로 사용되는 공간벡터의 지령에 불평형에 대한 오프셋 전압을 조정하여 각각 상단 커패시터와 하단 커패시터의 충전량 양을 조절하여 중성점 전압을 제어한다. 오프셋 전압의 크기는 두 출력 전압의 차이를 0으로 만드는 PI 제어를 통해 결정되며 소프트웨어적으로 간단히 출력 전압의 불균형을 보상시킬 수 있다.

### 3.3 반도체 변압기

교류 자기 변압기는 직류에 적용할 수 없기 때문에 반도체 변압기(SST)를 이용해 MVDC를 LVDC로 변환한다<sup>[6]</sup>.

#### 3.3.1 반도체 변압기 구성

그림 7은 MVDC를 LVDC로 변환하는 반도체 변압기의 구성도를 보여준다. DC/DC 컨버터로 사용되는 반도체 변압기는 중주파수 변압기(MFT)를 사용해 절연과 MVDC와 LVDC 사이의 전력 흐름을 양방향으로 전달하는 역할을 한다. 또한, 부품의 크기가 기존의 저주파수 라인 변압기보다 작아져 전력 밀도를 높일 수 있다.

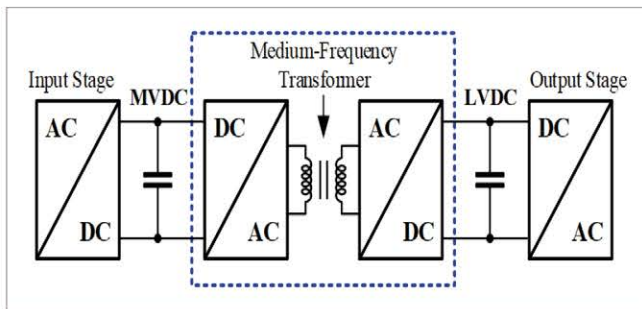


그림 7 반도체 변압기 구성도

#### 3.3.2 반도체 변압기 토폴로지

그림 8는 DC/DC 변환 반도체 변압기 토폴로지를 보여준다. 그림 8 (a)는 MMC 기반의 반도체 변압기 구조로써 MVDC의 전압 스트레스를 효과적으로 공유하기 위해 하프 브리지 모듈을 직렬 연결한다. 그러나 권선비가 큰 메가와 트급의 설계 및 제작은 절연과 냉각 설계 및 권선 배열 측면에서 어렵다. 그림 8 (b)는 가장 널리 사용되는 반도체 변압기 토폴로지인 직렬 연결에서 전원 모듈을 사용하는 직렬 입력/병렬출력 구성이다[7-8]. SST의 1차 측에서 MVDC의 전압 스트레스를 공유하고, 2차 측에서 병렬 연결하여 LVDC의 전류 스트레스를 공유하는 특징을 갖는다. 직렬 공진 변환기(SRC), 이중 하프 브리지(DHB), 이중 능동 브리지(DAB), 비동기 사중 능동 브리지(AQAB)와 같은 다양한 구조의 사용이 연구되고 있다.

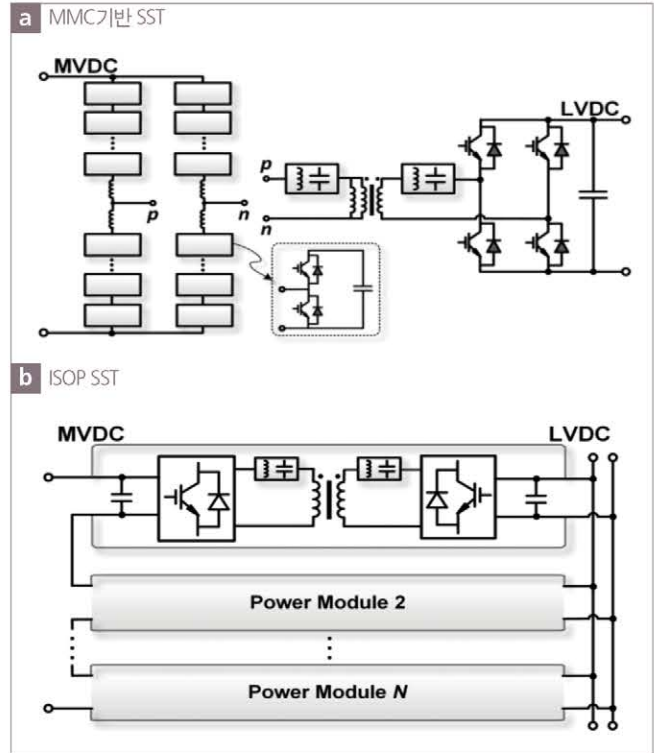


그림 8 DC/DC 변환 반도체 변압기 토폴로지

### 3.4 전기차 급속충전기

최근 전 세계 및 정부 기관의 다양한 친환경 정책에 의해 전기차의 보급 및 판매량이 크게 증가하고 있으며, 이에 대응하기 위해 전기차의 충전을 위한 급속충전기의 개발 또한 활발하게 진행되고 있다.

#### 3.4.1 급속충전기 시스템 구성

그림 9 (a)는 교류 배전망에서의 전기차 급속충전 시스템의 구성도를 보여준다. 교류 배전망에선 급속충전기는 교류 계통 전원을 입력으로 받아 직류 전압으로 정류하는 AC/DC 인버터와 차량의 요구사항에 따라 직류 전압을 제어할 수 있는

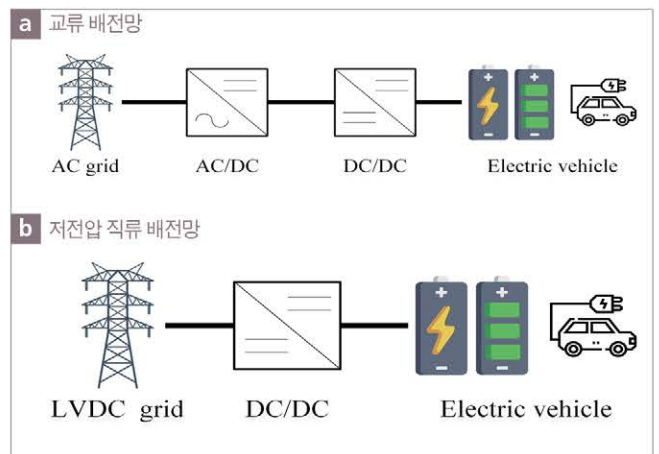


그림 9 전기차 급속충전 시스템 구성도

DC/DC 컨버터로 구성된다<sup>[9]</sup>. 이와 비교하여 그림 9 (b)에서 알 수 있듯이 저전압 직류배전망에선 AC/DC 전력변환단계가 생략되어 급속충전 시스템의 효율과 전력밀도를 크게 향상시킬 수 있으며, 이와 동시에 DC/DC 컨버터의 중요도가 크게 증가한다.

### 3.4.2 주요 DC/DC 토폴로지

그림 10는 급속충전기에 사용되는 주요 DC/DC 토폴로지를 나타낸다. 급속충전기용 DC/DC 토폴로지는 계통과 차량 간의 전기적 절연을 위해 절연형 DC/DC 컨버터가 주로 사용된다. 이 중 공진형 컨버터와 위상 천이 컨버터는 소프트 스위칭을 통해 DC/DC 전력변환단계의 고효율/고밀도화를 달성할 수 있다<sup>[10][11]</sup>.


공진형 컨버터 계열에선 그림 10 (a)의 LLC 공진형 컨버터가

주로 사용된다. LLC 공진형 컨버터는 변압기 1차측 스위치의 zero voltage switching (ZVS)와 2차측 정류회로의 zero current commutation으로 인해 높은 효율을 갖는다. 그림 10 (b)의 phase shift full bridge 컨버터는 1차측 스위치 레그의 위상차를 이용한 ZVS를 통해 LLC 공진형 컨버터와 마찬가지로 높은 효율을 달성할 수 있다. 두 토폴로지는 낮은 스위칭 손실 특성으로 인해 컨버터의 고주파수 동작을 가능하게 만들어, DC/DC 전력변환단계의 고 전력밀도 또한 달성할 수 있다.

여기에 더해, V2G(Vehicle To Grid)의 중요성이 대두되면서 그림 10 (c)의 CLLC 양방향 공진형 컨버터 및 그림 10 (d)의 dual active bridge 컨버터와 같이 소프트 스위칭을 통한 효율 향상과 동시에 양방향 전력 전달이 가능한 토폴로지 또한 주로 사용되고 있다.

## 4. 결론

약 120년 전 에디슨의 직류 전력망과 테슬라의 교류 전력망의 표준화 논쟁이 시작된 이후, 교류 전력망이 전력계통의 표준 시스템으로 자리잡게 되었다. 오랜 기간의 기술 발전을 통해 교류 전력망은 여전히 최선의 선택으로 존재하고 있는 것은 분명하다. 그러나 향후 전개된 전력 패러다임의 변환 속에서는 교류 전력망의 근본적인 한계는 분명해 질 것으로 예상되며, 이에 따라 직류 전력망 확대는 필연적이다.

직류 전력망 기술은 저전압 직류 배전을 중심으로 기술 개발이 진행되고 있으며, 향후 중전압 직류배전 또는 초고압 직류송전과 같은 보다 광위한 직류 전력망을 구축하기 위한 중요한 핵심 기술이 사용될 가능성이 크다. 전력변환기술은 직류 전력망을 구현하기 위한 Enabling Technology로, 저전압 직류 배전이 직류 전력망 기술의 근간임을 고려해볼 때 저전압 직류전력망용 전력변환기술은 DC 전력망 구축을 위한 주요한 시작이 될 것이다. 

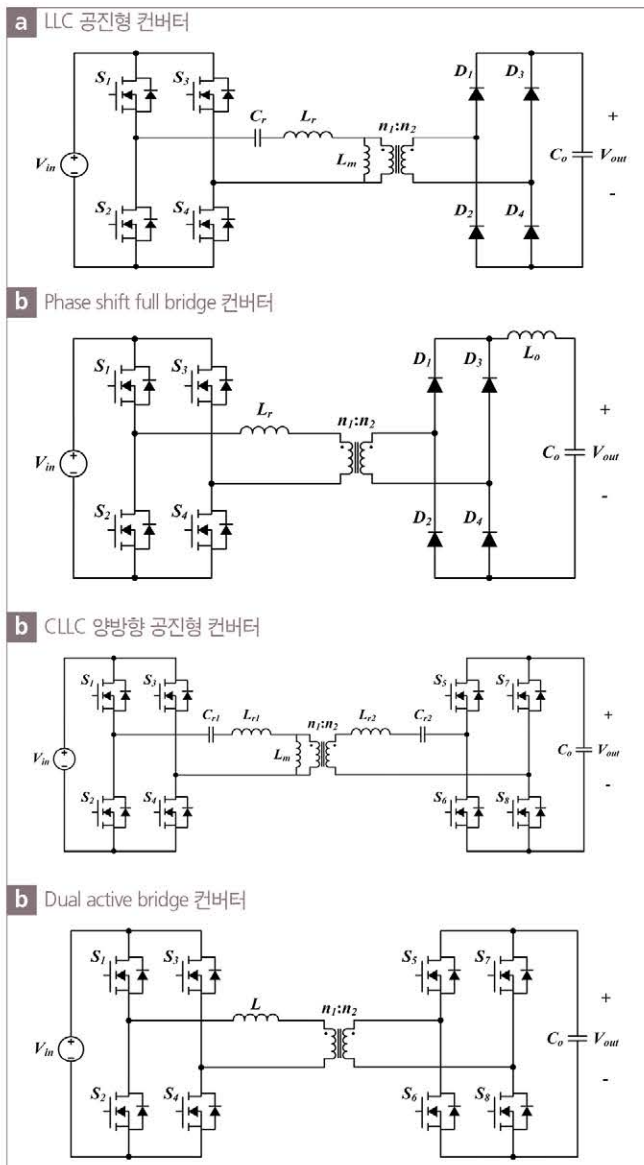


그림 10 급속충전기용 주요 DC/DC 토폴로지

- [1] R. Gadelrab, A. Nabih, F. C. Lee and Q. Li, "LLC resonant converter with 99% efficiency for data center server," 2021 IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC), pp. 310-319, 2021.
- [2] Y. Cui, "High voltage point of load converter for data center power supplies," PhD diss., The University of Tennessee, 2016.
- [3] R. Gadelrab, F. C. Lee, and Q. Li, "Three-phase interleaved LLC resonant converter with integrated planar magnetics for telecom and server application," in Conference Proceedings - IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition - APEC, Vol. 2020-March, pp. 512-519, Mar. 2020.
- [4] P. Salonen, P. Nuutinen, P. Peltoniemi and J. Partanen, "LVDC distribution system protection — Solutions, implementation and measurements," 2009 13th European Conference on Power Electronics and Applications, pp. 1-10, 2009.
- [5] Kim, Ho-Sung, et al. "Development of 3 level neutral-point-clamped rectifier for low voltage DC distribution." Proceedings of the KIPE Conference. The Korean Institute of Power Electronics, 2014.
- [6] X. Zhao et al., "DC solid state transformer based on three-level power module for interconnecting MV and LV DC distribution systems," in IEEE Transactions on Power Electronics, Vol. 36, No. 2, pp. 1563-1577, Feb. 2021.
- [7] L. Qu, D. Zhang, and B. Zhang, "Input voltage sharing control scheme for input series and output parallel connected DC-DC converters based on peak current control," IEEE Trans. Ind. Electron., Vol. 66, No. 1, pp. 429-439, Jan. 2019.
- [8] A. Mohammadpour, L. Parsa, M. H. Todorovic, R. Lai, R. Datta, and L. Garces, "Series-input parallel-output modular-phase DC-DC converter with soft-switching and high-frequency isolation," IEEE Trans. Power Electron., Vol. 31, No. 1, pp. 111-119, Jan. 2016.
- [9] M. J. Kim, Y. W. Kim, Y. Prabowo, and S. W. Choi, "Development of 50kW high efficiency modular fast charger for both EV and NEV," The Transactions of the Korean Institute of Power Electronics, Vol. 21, No. 5, pp. 373-380, Oct. 2016.
- [10] J. Deng, S. Li, S. Hu, C. C. Mi and R. Ma, "Design methodology of LLC resonant converters for electric vehicle battery chargers," in IEEE Transactions on Vehicular Technology, Vol. 63, No. 4, pp. 1581-1592, May 2014.
- [11] C. Y. Lim, Y. Jeong and G. W. Moon, "Phase-shifted full-bridge DC-DC converter with high efficiency and high power density using center-tapped clamp circuit for battery charging in electric vehicles," in IEEE Transactions on Power Electronics, Vol. 34, No. 11, pp. 10945-10959, Nov. 2019.

**박수성** 한양대 전기생체공학부 석·박통합과정

2020년 한양대 전기공학과 졸업.  
2020년~현재 동 대학원 전기공학과 석·박통합과정.



**장영섭** 한양대 전기생체공학부 석·박통합과정

2012년 인제대 공과대학 전자공학과 졸업.  
2019년~현재 한양대 대학원 전기공학과 석·박통합과정.



**박동환** 한양대 전기생체공학부 석·박통합과정

2014년 동국대 전자공학과 졸업.  
2017년~2020년 서호전기 기술연구소 연구원 재직.  
2014년~한양대 대학원 전기공학과 석·박통합과정.



**민성수** 한양대 전기생체공학부 석·박통합과정

2019년 한양대 전기공학과 졸업.  
2019년~현재 동 대학원 전기공학과 석·박통합과정.



**김래영** 한양대 전기생체공학부 교수

1997년 한양대 전기공학과 졸업. 1999년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 2009년 미국 Virginia Tech 전기공학과 졸업(공박).  
1999년~2004년 효성 중공업 연구소 선임연구원. 2009년~2010년 미국 National Semiconductor Senior Researcher.  
2016년~2017년 미국 Virginia Tech CPES 방문교수. 2010년~현재 한양대 전기생체공학부 교수. 당 학회 총무이사.

