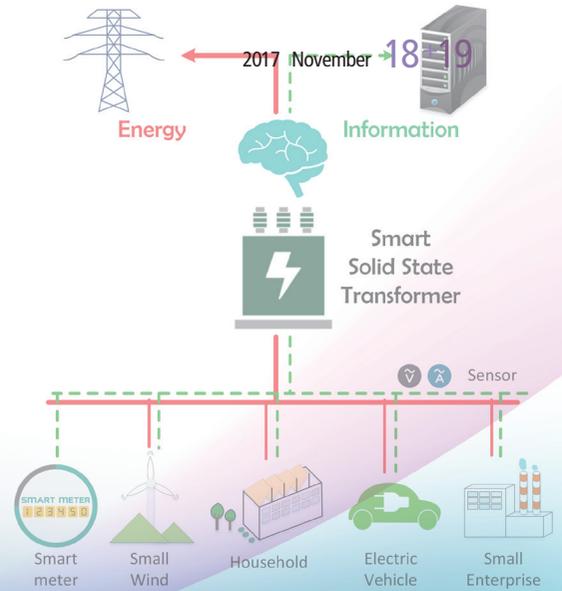


# DC배전 분야의 전력전자 기술

김 석 민 | 아주대학교 전자공학과 박사과정  
이 교 범 | 아주대학교 전자공학과 교수



## 1. 서 론

### 현대의

전력 시스템은 3상 교류를 기반으로 하고 있지만, 최초의 상업용 배전은 직류

로 구현되었다. 뉴욕 시 맨해튼 남부에 있는 토머스 에디슨(Thomas Alva Edison)의 펄스트리트 발전소(Pearl Street Station)는 1882년에 24 km의 이선 구리 선로를 통해 110V의 직류 배전을 시작하였다[1]. 그러나 낮은 전압에 의해 높은 저항성 손실이 발생하는 직류 배전은 1880년대 중반에 개발된 교류 시스템에 비해 비효율적인 시스템임이 증명되었다. 이때부터 니콜라 테슬라(Nikola Tesla), 윌리엄 스탠리(William Stanley) 등에 의해 활발히 개발된 3상 교류 송전과 배전 시스템은 효율적이며 신뢰성 높은 전기 공급 시스템의 초석이 되었다.

최초의 직류 배전 시스템의 쇠퇴 후 100년 이상이 지난 현재, 전력반도체소자와 케이블 기술의 비약적인 발전에 의해 직류는 다시 주목을 받으며 기존의 교류 전력 시스템에 접목되어 그 영역을 넓혀가고 있다. 1990년대부터 전압형 컨버터(Voltage source converter, VSC)를 사용하는 고압 직류(High voltage direct current, HVDC) 송전 시스템이 교류를 대체하는 강력하고 유연한 기술로 개발되고 있다. 최초의 상업 목적의 HVDC 프로젝트는 스위스의 Gotland 섬

에서 실증되었다. 이 프로젝트는 50MW (@ ±80kV)의 송전 선로를 통해 섬 내부의 전력망에 풍력 발전 단지를 연결하였다. 이후, 연안의 가스 플랫폼을 노르웨이 본토 계통과 연결한 프로젝트(84MW, ±60kV)와 핀란드와 에스토니아를 연결한 Estlink 프로젝트(350MW, ±150kV) 등 주목할 만한 연구 성과들이 나오고 있다. 최근에는 2-레벨 방식 대신 멀티레벨 컨버터를 사용하여 독일 연안의 풍력 발전 단지를 계통과 연계한 VSC 기반의 HVDC (400MW, ±150kV)와 Trans Bay 선로 프로젝트(400MW, ±200kV)가 있다. 오늘날의 VSC 기반의 HVDC 송전 시스템의 정격은 1GW (@ ±320kV)에 달한다.

최근의 트렌드인 MVDC 시스템은 HVDC 송전 시스템에 비해 상당히 낮은 전력과 전압 레벨을 사용하며 더욱 분산적인



그림 1. Gotland HVDC 컨버터 스테이션

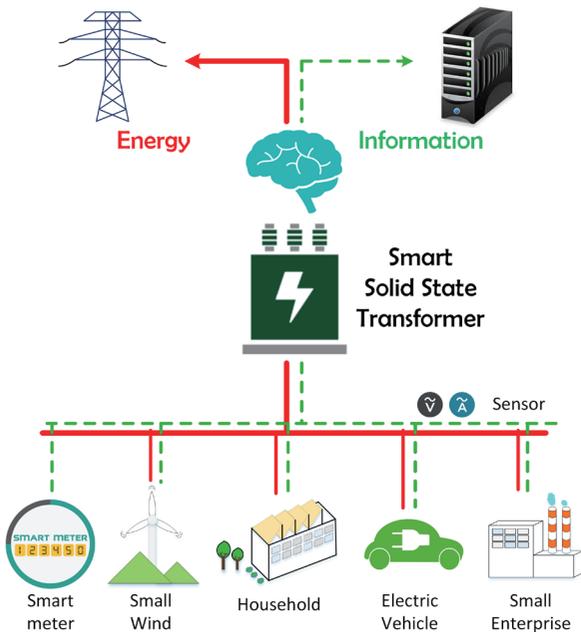


그림 2. 미래형 배전 계통 내의 SST 역할

발전능을 가능케 하는 많은 장점을 갖는다. 특히, 다양한 직류 발전원(풍력 단지 등)과 소규모 산업 네트워크에서 MVDC가 효율, 유연성, 비용 측면에서 탁월한 배전 기술로 인정받고 있다 [2]-[3]. 아직 MVDC 배전 시스템은 많은 연구 주제가 남아 있으며 현재 여러 연구 기관에서 프로토타입을 통한 실증 연구를 진행 중이다.

MVDC 배전 시스템의 핵심 기술은 전력전자 기반의 solid state transformer (SST)라고 할 수 있다. 1968년 맥머레이 윌리엄(McMurray William)은 solid state 스위치와 고주파 링크 변압기를 갖는 전자 변압기(Electronic transformer) 회로를 고안하였다. SST는 컨버터의 입력과 출력이 전기적으로 분리되며 양방향 전력 전달의 능동적인 제어 가능하다. 또한, 입력 전압의 변동 및 sag/swell 등의 전력 계통의 외란을 보상할 수 있으며 분산 발전원 또는 에너지 저장장치와 연계될 수 있다. 최근에는 다양한 제어와 통신이 가능한 차세대 SST인 smart transformer에 대한 연구도 진행 중이다[4].

본 기고에서는 차세대 분산형 MVDC 배전 시스템을 위한 SST의 전력전자 기술에 대해 살펴보려고 한다.

## 2. MVDC 배전 시스템용 SST 기술의 분류

그림 3은 SST 토폴로지를 결정하는 구조적 분류를 나타낸다. 직접 매트릭스 컨버터(Direct matrix converter)를 기반으로 하는 1단 구조는 MVAC에서 바로 LVAC로 변환하는 시스템이다. 단위 부피당 높은 전력밀도를 갖지만 DC-link 커패시터가 없기 때문에 다양한 기능을 수행하기에는 제약이 있다. 2단 구조는 간접 매트릭스 컨버터(Indirect matrix converter) 또는 두 개의 AC/DC 컨버터의 직류단이 접속된 구조(Back-to-back)를 기반으로 한다. 현대의 SST 구성을 위해 가장 주목 받는 3단 구조는 DC-link를 통해 각 변환 단계를 접속하여 입/출력 전압 및 전류의 분리가 가능하며 시스템 제어의 자유도가 높다.

이러한 변환 단계에 따른 분류 다음으로 SST 토폴로지는 모듈화 정도에 따라 구분된다. 모듈형(modular) 시스템은 낮은 전압/전류 정격을 갖는 여러 개의 셀을 블록처럼 연결하여 구성된다. 반대로, 비모듈형(non-modular) 시스템은 단일 전력 컨버터를 기반으로 하기 때문에 10kV 또는 15kV SiC MOSFET과 같은 고전압, 와이드 밴드갭(wide band-gap) 반도체 소자를 필요로 한다. 이러한 소자들은 아직 연구 목적으로만 구현이 가능하며 MVDC 구현이 가능한 제품은 나와 있

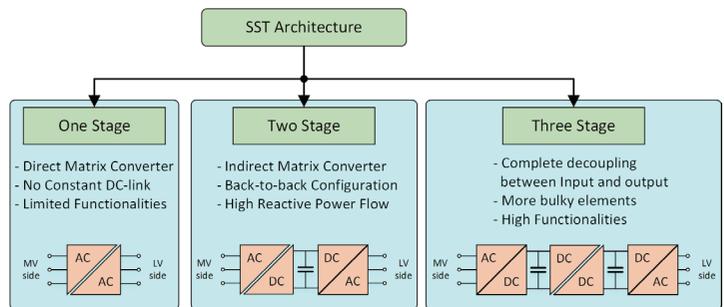


그림 3. 전력 변환 단계의 수에 따른 SST 토폴로지의 분류

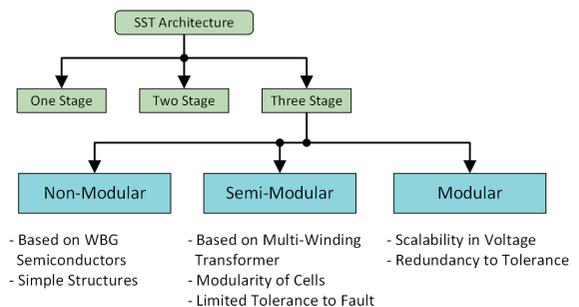


그림 4. 모듈화 정도에 따른 SST 토폴로지의 분류

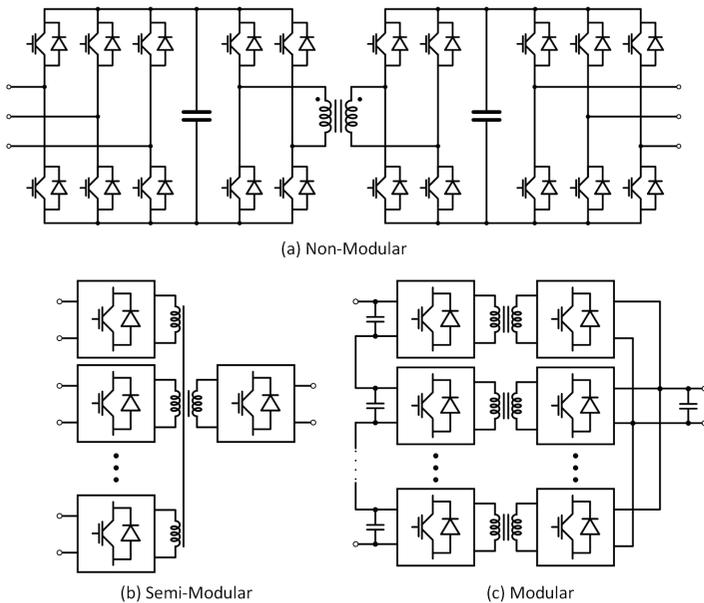


그림 5. 3단 변환 구조 내의 모듈화 정도에 따른 SST 토폴로지 분류

지 않다. 따라서 산업 분야에서 MV 구현을 위한 비모듈형 방법은 일반 IGBT를 직렬로 연결하여 사용하는 것이다. 그러나 이 토폴로지는 소자간의 전압 균형을 위해 추가적인 제어 기술을 요구한다.

비모듈형 구조는 반도체소자, 드라이버, 센서 등의 개수가 적어 고장 발생 가능성이 낮고 한 개의 변압기로 구성되는 장점이 있지만, 간편한 유지·보수, 고장 허용 제어를 위한 높은 여유율(redundancy), 전력 및 전압 규모의 용이한 조절 등 다양한 장점을 지닌 모듈형 구조가 MVDC 용 SST를 위해 더욱 적합한 토폴로지로 인정받고 있다[5]. 모듈형 구조는 비모듈형 구조에 비해 EMI 문제가 감소(낮은  $dv/dt$ )하며 일반적인 LV 정격의 소자를 사용하여 훌륭한 품질의 전압 및 전류를 출력할 수 있다.

MVDC를 위해 고려할 만한 또 다른 방식에는 준모듈형(semi-modular) 구조가 있다. 준모듈형 구조의 단위 셀은 모듈형 구조에 비해 구성이 더욱 복잡하다. 준모듈형 구조는 멀티 와인딩(Multi-winding) 변압기에 다수의 active bridge가 연결된다. 이 구조는 적은 수의 변압기를 사용하여 모듈형 구조와 동일한 장점을 가질 수 있다. 하지만 LV 측의 전압과 전력 규모의 조절이 어렵다는 단점을 갖는다.

### 3. 전력변환 단계별 토폴로지 종류

#### 3.1 MVAC-MVDC 컨버터

MV 측 컨버터의 주목적은 MVAC 계통으로부터 그 다음 변환 단계 또는 최종 분산 계통으로 유효 전력을 전달하며 계통 품질을 위해 무효 전력을 제어하는 것이다. MV 컨버터를 구현하기 위해 가장 간단한 방법은 3-레벨 NPC 컨버터 토폴로지를 사용하는 것이다. 단, MV 전압의 저지를 위해 직렬 연결된 소자를 사용해야 한다. 이 토폴로지는 이미 산업계에서 충분히 검증되었으며 구조가 간단하고 DC-link를 구성할 수 있다는 장점이 있다. 그러나 레벨의 개수가 적기 때문에 큰 용량의 필터를 사용해야 하며 상당히 높은 스위칭 주파수가 요구되기 때문에 변환 효율이 낮다는 문제점을 갖는다.

직렬 연결 소자의 대안으로 WBG 트랜지스터를 사용할 수 있지만 현재까지는 연구 단계에 있다.

3-레벨 토폴로지를 대신하는 모듈형 구조에는 다단 H-bridge 컨버터(Cascaded H-bridge converter, CHBC)가 있으며 MV 드라이브에 널리 적용되어왔다. 모듈형 설계가 가능하고 제어의 복잡도가 다른 멀티레벨 토폴로지에 비해 낮으며 단위 셀이 낮은 스위칭 주파수에서 동작한다는 장점을 갖는다. 단, 미래의 지능형 직류 배전 계통에 다양한 직류 전압원의 접속을 가능하게 하는 필수적인 노드인 DC-link가 부재하다는 것이 치명적인 단점이다. 또한 CHBC와 함께 다음 변환 단계인 DC/DC 변환부를 구성하기 위해서는 엄청난 수의 DC/DC 컨버터가 요구된다.

모듈형 구조와 낮은 스위칭 주파수 동작의 요구를 만족할 수 있는 또 다른 토폴로지에는 모듈형 멀티레벨 컨버터(Modular multilevel converter, MMC)가 있다. MMC는 DC-link를 구성할 수 있기 때문에 CHBC에 비해 높은 경쟁력을 갖는다. MMC는 HV 계통을 위한 토폴로지로 선택되어 널리 사용되었다. 그러나 MV 범위에서 MMC를 적용함에 따라 얻게 되는 장점은 여전히 많은 연구를 통해 확인 중에 있다. 복잡한 제어와 큰 부피의 DC-link 커패시터 또한 앞으로 극복해야 할 문제이다.

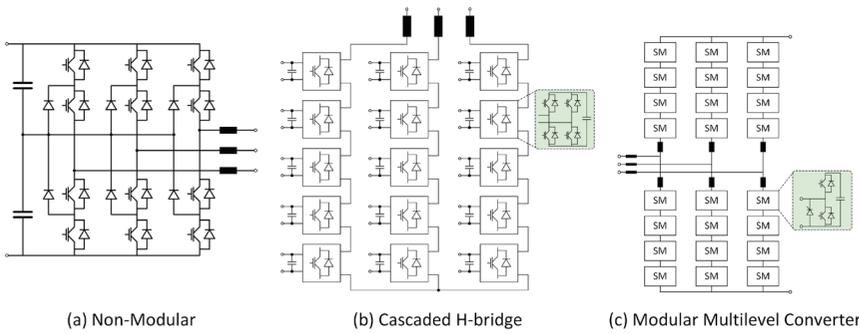


그림 6. MVAC-MVDC 컨버터 토폴로지

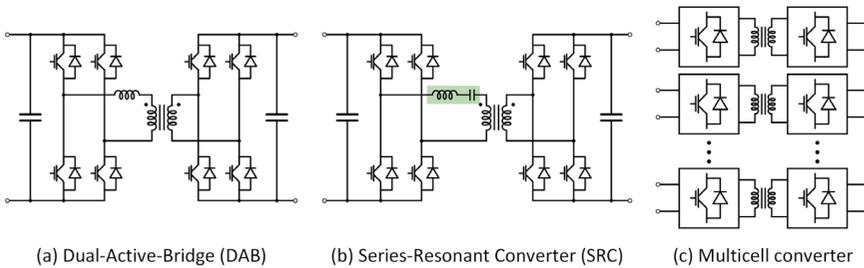


그림 7. MVDC-LVDC 컨버터 토폴로지

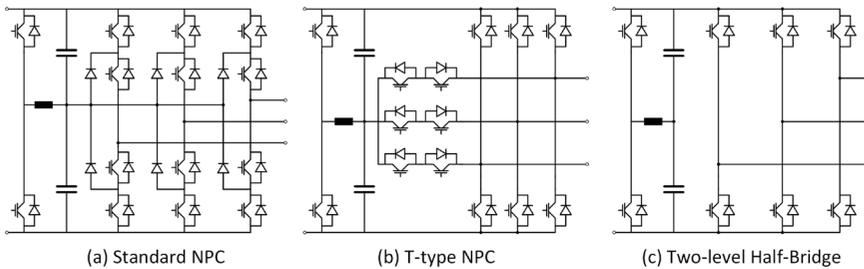


그림 8. MVDC-LVDC 컨버터 토폴로지

### 3.2 MVDC-LVDC 컨버터

DC/DC 컨버터는 LV 측에 높은 정격 전류를 공급해야 하며 고주파 절연, 고효율 등의 엄격한 요구사항을 만족해야 하기 때문에 SST 설계에서 가장 심도 깊은 연구가 필요한 변환 부이다. 이러한 높은 요구사항을 만족하기 위해 두 가지 컨버터 솔루션이 가장 널리 연구되었다. 첫째는 기존의 컨버터 토폴로지에 높은 정격의 소자를 적용하는 것이며, 두 번째는 다수의 모듈이 전체 전압과 전력을 공유하는 모듈형 구조를 기반으로 하는 토폴로지이다. 모듈형 기법은 많은 수의 소자를 요구하지만, 단일 컨버터 토폴로지에 비해 낮은 전압 변동률 (dv/dt)에 의한 EMI 문제 저감, LV 정격의 소자 사용 가능, 모듈형 구조, 충분한 여유율을 이용한 고장 허용 기술 등 다양한 장점을 갖는다.

여러 컨버터 토폴로지 가운데 dual-active-bridge (DAB)와 series-resonant (SR) 컨버터가 소프트 스위칭 가능, 고효율, 높은 전력 밀도 등의 장점으로 널리 채택되어 사용되고 있다. SR 컨버터는 넓은 범위의 전압을 출력할 수 있으며 센서의 개수를 줄일 수 있다. 그러나 전력 전달 방향에 따른 임피던스 및 공진 주파수가 달라지기 때문에 양방향 전력 제어를 위해 어려움이 있다. 전압 제어 및 전력 흐름 제어의 요구가 증가함에 따라 전달 전력의 능동 제어로 동작하는 DAB 컨버터가 더 많은 장점을 갖는 토폴로지로서 사용되었다. 단, DAB는 변압기 전류에 발생하는 직류 오프셋(offset)을 대응하기 위한 추가적인 제어 기법이 요구된다. Multiple-active-bridge (MAB) 컨버터는 DAB와 SR 컨버터의 대안으로 제안되었다. MAB 컨버터는 DAB 컨버터와 동일한 특성을 가지며 단일 변압기에 많은 수의 active bridge를 연결하였기 때문에 고주파 변압기의 개수를 줄일 수 있는 장점을 갖는다. MVDC-LVDC 변환을 위해 MAB 컨버터의 1차 측은 직렬로 연결하여 MV 전압을 공유하고 2차 측은 병렬로 연결하여 LV 측에서 높은 전류를 출력할 수 있도록 구성한다.

### 3.3 LVDC-LVAC 컨버터

세 가지 전력변환 단계에서 LV 컨버터 부는 가장 높은 전류를 공급해야 하며 LV 배전 계통에 가장 가까이 위치하기 때문에 안전성 향상을 위한 보호 기술이 필요하다. LV 측은 소자와 토폴로지 선정에 있어 다양한 선택이 가능하다.

2-레벨 Half-bridge (HB) 토폴로지는 DC/AC 변환을 위한 가장 간단한 방법으로 오랜 기간 동안 사용되었다. 하지만 가

장 적은 수의 반도체소자로 구성되는 HB 토폴로지는 높은 전압 레벨과 다양한 제어 기능에 대한 요구의 증가를 만족하기 어렵다. 3-레벨 NPC 토폴로지는 600V 급의 낮은 정격을 갖는 소자를 사용할 수 있고 2-레벨 토폴로지에 비해 출력 파형과 시스템 효율을 동시에 향상시키기 때문에 2-레벨 토폴로지 다음으로 산업계에서 가장 널리 채택되어 사용되고 있다. 높은 전류 정격을 만족하기 위해서는 위와 같은 2-레벨, 3-레벨 컨버터를 병렬로 연결한 멀티셀 토폴로지를 사용한다. 멀티셀 토폴로지는 인터리브드(interleaved) 제어 기법을 이용하여 DC-link 리플 전류를 줄일 수 있다[6]. 그러나 병렬로 연결된 컨버터 사이에서 발생하는 순환 전류를 처리하기 위한 추가적인 대책이 필요하다.

LV 계통은 부하에 의해 쉽게 변동 및 사고가 발생할 수 있기 때문에 MVAC-LVAC의 전력변환을 위해 SST를 적용하는 경우, LV 측 컨버터는 이러한 계통 사고에 의한 이상 전류에 대한 대책을 마련해야 한다. 기존의 변압기는 과전류 및 과전압을 비교적 오랜 시간 견딜 수 있으나 전력전자소자 기반의 SST는 고장 전류에 대한 허용 시간이 매우 짧다. 따라서 제어를 통한 과전류 제한은 LV 컨버터의 필수적인 기능이다[7]-[8].

## 4. 결 론

본 기고에서는 직류 배전을 위한 전력전자 기반의 SST 기술에 대해 다루었다. SST는 적은 무게와 부피로 구성이 가능하여 기존의 전력 변압기를 대체하는 새로운 전력변환장치로 앞으로 통신 기술과 접목하여 미래의 배전 계통을 위한 훌륭한 대안이 될 것으로 보인다. 다양한 SST 컨셉 가운데 모듈형 구조의 VSC는 고장 허용 제어, 전압 레벨 증가, 출력 파형 조정 등 다양한 기능을 수행할 수 있다. 또한 기존의 교류 시스템과의 호환, 다양한 직류 발전원 및 직류 부하와의 연계를 고려할 때, 모듈형 VSC 중에서도 DC-link를 구성할 수 있는 토폴로지가 직류 배전을 위한 SST 컨셉에 더욱 적합하다. 현재 SST 기술은 활발한 연구가 진행되고 있는 단계이며 앞으로 최적의 전력 레벨, 제공 서비스, 통신, 보호 기술 등의 다양한 도전 과제의 해결을 통하여 미래의 배전 계통 구성에 큰 부분을 담당할 것으로 기대된다. 

## 참고문헌

- [1] C. Sulzberger, "Triumph of AC from Pearl Street to Niagara," *IEEE Power and Energy Mag.*, vol. 1, no. 3, pp. 64-67, May/Jun. 2003.
- [2] L. Max and S. Lundberg, "System Efficiency of a DC/DC Converter based Wind Farm," *Wind Energy*, vol. 11, no. 1, pp. 109-120, Jan./Feb. 2008.
- [3] F. Mura and R. W. D. Doncker, "Design Aspect of a Medium-Voltage Direct Current (MVDC) Grid for a University Campus," in *Proc. IEEE ECCE Asia (ICPE ECCE)*, pp. 2359-2366, May 2011.
- [4] M. Liserre, G. Buticchi, M. Andresen, G. D. Carne, L. F. Costa, and Z. X. Zou, "The Smart Transformer: Impact on the Electric Grid and Technology Challenges," *IEEE Ind. Electron. Mag.*, vol. 10, no. 2, pp. 46-58, Jun. 2016.
- [5] S.-M. Kim, J.-S. Lee, and K.-B. Lee, "A Modified Level-Shifted PWM Strategy for Fault Tolerant Cascaded Multilevel Inverters with Improved Power Distribution," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 63, no. 11, pp. 7264-7274, Nov. 2016.
- [6] M.-G. Jeong, H. U. Shin, J.-W. Baek, and K.-B. Lee, "An Interleaving Scheme for DC-Link Current Ripple Reduction in Parallel-Connected Generator Systems," *Journal of Power Electron.*, vol. 17, no. 4, pp. 1004-1013, July 2017.
- [7] U.-M. Choi, F. Blaabjerg, and K.-B. Lee, "Reliability Improvement of a T-type Three-Level Inverter with Fault-Tolerant Control Strategy," *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 30, no. 5, pp. 2660-2673, May 2015.
- [8] J.-S. Lee and K.-B. Lee, "Open-Circuit Fault Tolerant Control for Outer Switches of Three-Level Rectifiers in Wind Turbine Systems," *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 31, no. 5, pp. 3806-3815, May 2016.