

2024

Vol.4

# ISSUE REPORT

전력계통 디지털화를 위한  
전력반도체 기반  
차세대 디지털 전력기기 기술

## 전력계통 디지털화를 위한 전력반도체 기반 차세대 디지털 전력기기 기술

---

1. 디지털 전력기기 개요
2. 디지털 전력기기 동향
3. 차세대 디지털 전력기기 핵심기술
4. 결론 및 시사점

ISSUE  
REPORT

---

# I. 디지털 전력기기 개요

## ① 디지털 전력기기란?

- **디지털 전력기기는 전력반도체를 활용한 전력변환기술 기반의 차세대 전력기기로 디지털 전력제어를 통한 기존 중전기기에서 불가능했던 계통 전력품질 개선이 가능한 기기**
  - IoT 기술의 비약적인 발전으로 기존 기계적 구조 기반 전력기기 → 디지털 전력기기\*로 대체 진행 중
  - 전력반도체 기반의 전력변환기술을 활용한 디지털 제어 중심 전력기기
  - 기계식 구조를 가지는 기존 변압기, 차단기 등의 시스템을 차세대 전력반도체 기반 전력변환장치를 접목·대체하여 디지털 능동 제어가 가능한 전력기기
  - 대표적으로 전력변환기와 변압기의 권선 일부를 접속하여 변압기의 기능을 향상시킨 하이브리드 반도체 변압기, AC/DC 계통에 모두 직접 연계가 가능하며 양방향 전력변환이 가능한 반도체 변압기, 전력반도체의 빠른 반응성을 기반으로 안정적인 고전압 회로 차단을 수행하는 반도체 차단기 등이 있음
  
- **디지털 전력기기는 실시간 디지털 능동 제어를 통해 다양한 상황에서 전력 품질(전압, 주파수, 역률 등) 보상 제어가 가능하며 에너지효율 극대화 가능**
  - 디지털 제어를 통해 재생에너지의 단점으로 지적되는 발전 불안정성, 수요관리 불균형, 내구성 등의 문제점을 완화
  - 디지털 전력기기는 디지털 제어 기반의 전압, 전류제어, 역률 등의 제어를 통해 전력품질 보상이 가능하고 AI, 머신러닝 등의 차세대 제어 기술의 접목도 가능
  - 무효전력, 역률제어 등을 통해 전력망 유연화 및 에너지 효율 향상을 통한 온실가스 직·간접 배출 저감 가능
  - 디지털 전력기기 사용시 FACTS와 같은 별도의 보상기기 없이 전력품질 개선이 가능하며 실시간 통신을 통해 전력계통 안정화 운영이 가능
  
- **디지털 전력기기는 향후 전력계통 디지털화에 대응하기 위한 핵심기술에 대응이 가능**
  - 디지털 변전소, DC송배전, 스마트그리드, 전기차 충전 인프라 등은 디지털 제어를 수행할 수 있는 전력변환기 기반의 디지털 전력기기 적용이 필수적
  - 계통 이외에도 E-모빌리티, 선박 등 다양한 산업군에 응용이 가능하고 기술의 확장성이 높아 향후 차세대 전력산업의 핵심 요소기술이 될 것으로 전망

[ 직류배전 확대 등 전력계통 디지털화에 대응을 위한 핵심기술<sup>1)</sup> ]

<b>공급능력 확보</b>	대용량 분산전원	<b>스마트 녹색 전력공급</b>	다수 신재생 전원 최적화 연계 기술
	계통 연계 기술		최적 분산전원 출력제어 기술
	정지형 전력기기		원자력 발전 최적 출력 제어
	친환경 기자재		
<b>전력품질 유지</b>	차세대 통합 배전망 운용 시스템	<b>스마트 전력망</b>	진단 및 자가 복구 기능
	지능형 배전기기		마이크로그리드 운영기술
	전력품질보상		ESS이용 계통 안정화 기술
	진단/측정		송전단위 DC배전 구축
<b>배전 지능화</b>	지능형 제어	<b>스마트 운송</b>	전기차 충전 제어 최적 관리
	전력기기 상호운용성		전력 품질영향 최적 관리
	에너지저장		
	직류배전		
<b>종합 경제성</b>	최적 통신솔루션	<b>스마트 부하관리</b>	특수상황 및 장기수요예측 고도화 기술
	정보처리기술		개선된 요금제 적용 및 품질 차별화
	디지털 기반 운용시스템		
	차세대 설비관리시스템		
<b>고객 서비스</b>	고객설비 최적화	<b>스마트 네트워크</b>	고신뢰성 정보 네트워크 구성 기술
	수요관리		진보된 보안 체계 및 효율적 DB구축
	안전기술		

[ 전력계통 내 디지털 전력기기의 적용 가능 분야(배전, 자동화, 제어)<sup>2)</sup> ]



1) 직류배전기술의 요소기술 개발사례 및 시장전망 세미나 자료, 김정훈  
 2) 전력계통 구성도 및 관제시스템, 한전 계통계획처

## ② 디지털 전력기기 필요성

- **현재 전력계통은 발전-송전-배전으로 구성되어 전력을 수용가로 전달하는 구조를 가지며 이 모든 과정에서 절연매질 변환과정에서 발생하는 온실가스(직접적 배출)와 전력변환 에너지 손실(간접적 배출) 저감을 위한 기술개발 필요**
  - 국내 전력산업은 발전사→계통운영자→사용자 간 수직적 구조를 가지고 있고 아날로그 기반의 기기를 사용하고 있어 일부 분산전원 이외 사용자와의 양방향 소통이 어려움
  - 현재까지 송배전 전력기기는 기계식 시스템으로 구성되어 있고 SF6, CH4, CO2 등 수많은 온실 가스를 배출\*하고 있어 이를 저감하기 위한 신소재·부품 기반의 디지털 전력기기로의 전환이 시급
  - \* 국내 전력기기는 '19년 기준 약 200만톤의 CO2 배출
  
- **전력공급을 위한 변전소 운영 및 전력품질은 세계 최고 수준이나 그 후방 산업인 소재·부품·디지털 전력기기 기술은 대부분 중소기업의 영역으로 글로벌 선진사 대비 5년 이상 격차가 벌어져 있어 신기술 개발 필요**
  - 특히, 송배전 변압기는 중소기업간 경쟁제품으로 지정되어 있으나 국내 제조사는 기계식 변압기 납품에 치중하고 있어 R&D 기술생태계가 구축되어 있지 않고 해외 선진사 기술종속 위험
  - 선진사 대비 열악한 시설 및 원천기술 확보가 지연됨에 따른 기술격차를 해소하고 수출경쟁력 확보를 위한 중소기업 핵심기술 개발 필요
  
- **국내 전력계통은 수십년간 안정적으로 운영되었으나 최근 직류부하 증가, 분산전원 확대, 기기 노후화 등에 따른 물리적 요인 변화와 디지털화·지능화 등 차세대 트렌드 변화에 대한 대응이 미흡한 상황**
  - 특히, 직류송배전이 각광받고 있는 상황에서 기존 변압기에서 대응이 불가능했던 계통안정화, 운영 최적화 알고리즘, 능동 제어의 기능을 수행할 수 있는 반도체 변압기 연구가 전세계적으로 수행되고 있음
  - 안정적인 전력공급을 위한 수급체계 안정화를 위해 중간 변환단계의 반도체 변압기 등 디지털 전력기기 기술개발이 시급
  - 우리나라는 전체부하의 40%이상을 수도권에서 소비하고 있어 인프라를 고려할 때 부하가 집중됨에 따른 전력부족, 품질 저하 등이 향후 경제적, 사회적인 큰 파급효과를 불러올 것으로 예상
  - 기존 전력기기와 차세대 전력변환 기술의 융합 및 IoT 기술 접목을 통한 디지털 전력기기 개발을 통해 스마트 전력계통 구축 필요

■ **신재생에너지, ESS 등 분산전원, 마이크로그리드 등 계통망 다변화와 직류배전 등 차세대 전력망 구축에 대응하고 전력계통 신뢰성 확보와 고전력품질 유지를 위한 디지털 전력기기 핵심 기술개발 필요**

- 전세계 전력계통이 고전압화·디지털화·직류화로 개편됨에 따라 기존 기계식 변압기 기능만으로는 계통 안정성을 확보하기 어려우며 별도의 부가장치 사용이 강요됨
- OLTC(탭절환기), FACTS, 등 변압기 및 배전계통 전력품질 보상을 위한 부가장치는 인프라 구축·유지보수 측면에서 계통운영자에게 큰 부담으로 작용
- 이러한 별도 장치 없이 단일 시스템으로 계통 신뢰성 향상이 가능하고 계통운영자와 실시간 통신 기반 안정적 운영이 가능한 배전계통 능동제어 전력변환 기술개발 필요

## II. 디지털 전력기기 동향

### ① 전력계통 디지털화 주요 이슈

- 계통운영자가 전력을 단방향으로 공급하는 기존 중앙집중형 송배전 계통은 최근 신재생에너지 등 분산전원 연계가 확대됨에 따라 Bottom-up 구조로 개편되고 있으며 이에 따라 양방향 전력계통 운영이 필요하도록 패러다임이 변화

- 발전-송전-배전으로 이어지는 전력계통을 구성하는 기기 및 인프라에 디지털화 기술을 접목시켜 전력계통의 지능화 및 스마트화 달성 가능
- 신재생에너지, ESS, 전기차 충전기 등 다양한 전력원이 계통에 연계될 경우 전력계통의 전압, 주파수 유지에 악영향을 미치므로 계통 전력품질 보상·유지를 위한 전력기기 개발 필요성 대두
- 전력계통에 디지털 기술 적용을 위해서는 계통 최적화 운영 프로세스를 수행할 수 있는 디지털 능동 제어 기반의 新전력기기가 새롭게 개발 진행 중
- 부하 다양화, 전력사용량 증가에 따라 계통의 전력품질 악화에 따른 사고를 예방하고 사용자의 시스템을 보호할 수 있는 보호기능을 가지는 전력기기의 필요성 증대

#### ■ 에너지 산업 디지털화 확대

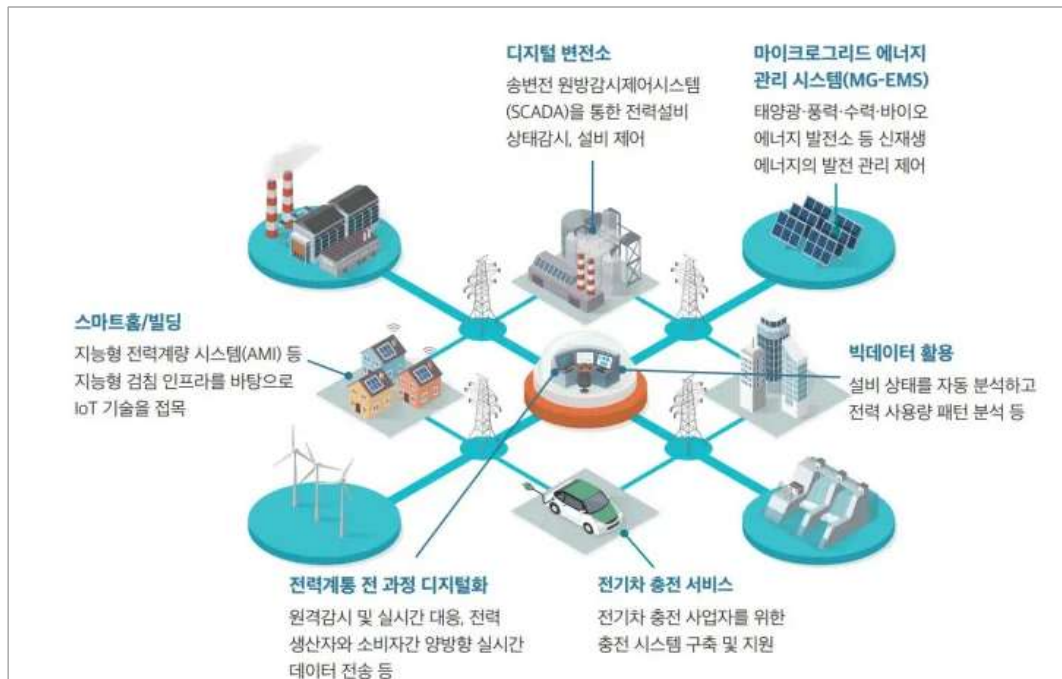
- 전력 데이터를 상호 연결하고 서로 공유함으로써 공급자-사용자 간 유기적인 연계를 가능하게 하고 전력계통 전 영역의 가치사슬에 적용 가능
- 에너지 디지털화 시장은 '25년 640억 달러에 이를 것으로 전망<sup>3)</sup>되고 있으며 양방향 전력변환 및 통신 기반 디지털 전력기기 시장 확대 전망
- 에너지 디지털화 구축을 위해 우리나라의 전력계통 스마트화·디지털화는 필수적인 요소이며 에너지 효율 향상, 신규 비즈니스 모델 개발 등을 위해 기존 기계식 시스템 → 스마트 전력기기로의 변화가 요구됨
- 기존 송배전 분야에서 계통 최적화를 위해 마이크로그리드 등의 개념이 활발히 도입되고 있으며 향후 전력의 실시간 이동에 따른 최적운영 플랫폼 구축이 필요

3) 에너지 산업의 디지털화(Digitalization)가 가져올 미래, 2019.01, 삼정KPMG 경제연구원

## ■ DC 전력망 구축 확대

- 신재생에너지, 마이크로그리드 등 DC 전원이 증가함에 따라 기존 AC 기반 전력망의 손실 저감 및 효율적 전력전송을 위해 DC 전력망 구축 필요성 대두
- DC 전력망은 AC 전력망에서 발생하는 부하 혹은 연계에 따른 주파수 비동기(decoupling)에 대한 문제가 발생하지 않아 타 전력망과 안정적이고 빠른 연계가 가능
- 제2차 지능형전력망 기본계획 및 제3차 에너지기본계획 등에 따라 DC 기반의 전력망 구축계획을 통해 디지털변전소를 중심으로 DC 기반 변환소 및 분산전원 구축로드맵 수립
- 국내 DC 전력망은 정부의 ‘그린에너지 전략로드맵(‘11년)’에서 전략품목으로 선정되어 DC 배전망 설계 및 운영기술, DC 배전기기 제작기술을 정의하는 등 기술개발의 필요성이 강조되어 상용화 연구 추진 중
- DC 전력망은 계통전압을 AC↔DC, DC↔DC 형태로 변환하는 전력변환장치, DC 개폐기, 차단기 등으로 구성되며 이러한 기기는 전력변환 기술이 적용된 차세대 전력기기의 적용으로 실현 가능

[ 한전 KDN에서 제시한 전력계통 디지털화 비전 ]

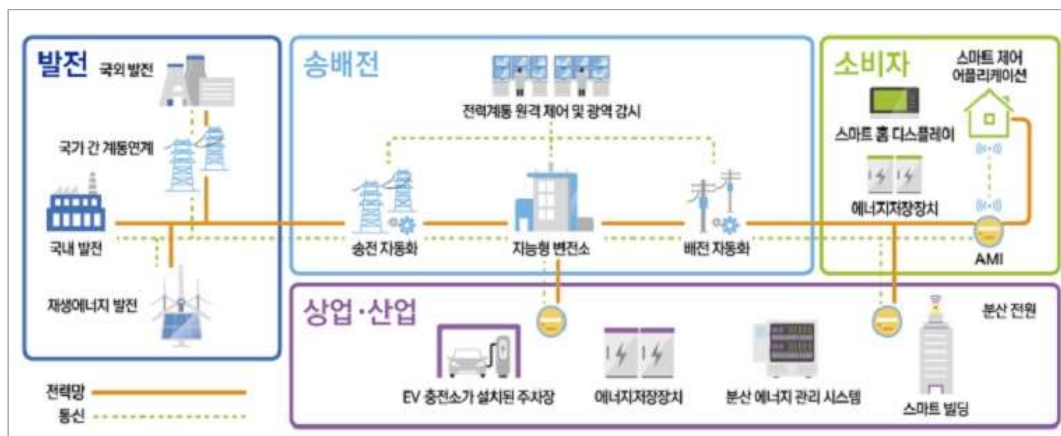


## ② 국내외 정책 및 기술 동향

### ■ 정부의 탄소중립 이행계획 및 신재생에너지 등 발전량 다변화·확대 정책에 따라 전기산업 온실가스 다배출 저감 및 디지털 전환을 위한 차세대 전력기기 개발 추진

- (2050 탄소중립녹색성장위원회) '23년 정부 주도로 '분산에너지 활성화를 위한 스마트 전력시스템 구축'을 통해 5년간 3.7조원을 투자해 분산형 발전 확대 구축 제시('22년 13.2% → '27년 18.6%)
  - 전력 공급 유연화와 소비 스마트화 시스템 구축을 위해 기존 전력기기에서 불가능했던 실시간 상위 통신이 가능한 디지털 전력기기의 개발 필요성 명시
  - 전력망 디지털화 및 마이크로그리드 활성화 정책에 따라 계통간 연계가 자유롭게 가능하며 연계시 발생될 수 있는 주파수 불균형, 역률저하 등의 문제를 해소하기 위한 스마트 능동제어 전력기기 개발 필요
- (제3차 지능형 전력망 기본계획4) ICT 기술을 이용한 실시간 데이터 수집, 통신·제어 등의 양방향 운영을 통해 전력 수요와 공급을 효율적으로 관리하기 위한 기반 마련
  - (핵심 전략) ①분산에너지 공급 안정성 강화, ②스마트 전력소비 체계 구축, ③전력계통 운영시스템 고도화, ④마이크로그리드 활성화 기반 마련, ⑤지능형 전력망 산업경쟁력 강화
  - 태양광, 연료전지 등 분산에너지원을 통합하여 실시간으로 관리하고 양방향 판매가 가능하도록 실시간 최적화 제어가 가능한 기기의 개발 필요성 제시
  - 디지털 전력기기는 상위 제어주체(계통운영자)와의 실시간 통신연계 기술을 필수적으로 탑재하고 있어 지능형전력망 표준·인증 활성화 가능

[ 한전 KDN에서 제시한 전력계통 디지털화 비전 ]



[ 추진전략 및 세부계획 ]

추진전략	세부계획
① 전력공급 유연성 강화	<ul style="list-style-type: none"> <li>전력공급 유연성 자원 확보</li> <li>통합발전소(VPP) 도입</li> </ul>
② 스마트한 전력소비 체계 구축	<ul style="list-style-type: none"> <li>수요자원 시장 운영 확대</li> <li>스마트 전력계량 시스템 구축 및 계시별요금제 확대</li> </ul>
③ 전력계통 시스템 디지털화	<ul style="list-style-type: none"> <li>분산에너지 핵심 기술개발</li> <li>분산에너지 운영시스템 마련</li> <li>ICT 기반의 전력시스템 스마트화</li> </ul>
④ 마이크로그리드 활성화	<ul style="list-style-type: none"> <li>유형별 핵심 마이크로그리드 모델 개발</li> <li>에너지 프로슈머 활성화 촉진</li> </ul>
⑤ 지능형전력망 산업 생태계 구축	<ul style="list-style-type: none"> <li>지능형전력망 표준·인증 활성화</li> <li>지능형전력망 산업 활성화 기반 조성</li> </ul>

- 한전과 전력그룹사 탄소중립 비전 “ZERO for Green”에서 발전, 전력망, 소비효율화 등 전력산업 벨류체인 전 과정에 걸친 탄소중립화 추진<sup>5)</sup>
- 또한, ‘17년 친환경 전력기기에 대한 한전 개발 로드맵을 통해 송전분야, 신송전분야, 변전분야, 감시제어 분야 전력기기 디지털화 개발계획 수립

[ 한전의 탄소중립 대응 R&D 전략 ]



5) 탄소중립 시대, 전력산업 미래와 한전의 기술개발 전략, 2022, 한국전력공사

## ■ 해외 각국에서도 에너지효율 향상을 위한 다양한 정책을 시행중이며 에너지 관리 관점에서 디지털화 기술의 적용을 추진

- 전세계 약 150개국에서 신재생 보급목표를 수립하고 확대 지원 제도를 운영중<sup>6)</sup>
- 태양광 및 풍력 전원에 대한 지원확대에 따라 화석연료 기반의 에너지 산업은 신재생, 원자력 중심으로 개편되고 있어 디지털 전력계통 인프라 구축 및 최적운영 전략 수립이 시급
- 미국은 특히, 전기차 보급 확대에 집중하고 있으며 충전 인프라 배치에 75억 달러, 청정 차량에 125억 달러 등 행정명령을 발동하고 있어 해당 산업 활성화에 따른 DC 전력기기 시장 확대가 예상됨
- 송배전 인프라 개선 및 확대 수요가 높아짐에 따라 변압기, 차단기 등의 디지털화 전환 추진 중
- Siemens, Schneider, GE 등 각국의 전력기기 기업들도 그리드 신뢰도 향상 및 운영비용 절감을 위해 IoT 등 디지털 솔루션을 도입하고 있으며 디지털 전력기기의 개발도 추진 중
- 일본의 TEPCO(동경전력)은 송전선로의 고장을 감시진단하는 AI 시스템을 개발하여 적용중이며 미국 AEP는 ABB와 협력하여 변전설비 자산관리시스템 VENTYX를 개발
- 계측기술 기반의 설비 진단 및 자산관리까지 통합플랫폼을 구성하고 있으며 선로 고장에 대한 대응, 품질 개선등을 위해 디지털 전력기기의 필요성 증대
- 독일 E.ON의 태양광 저장 솔루션, 프랑스 ENGIE의 에너지 관리 플랫폼, 영국의 가상 에너지 저장소(플랫폼) 등 에너지효율 향상 및 분산형 에너지 장치 통합화 플랫폼을 제공 중

6) 주요국 신재생에너지 지원제도 현황 및 변화과정, 2021.7, 전기저널

### Ⅲ. 차세대 디지털 전력기기 핵심기술

#### ① 반도체 변압기

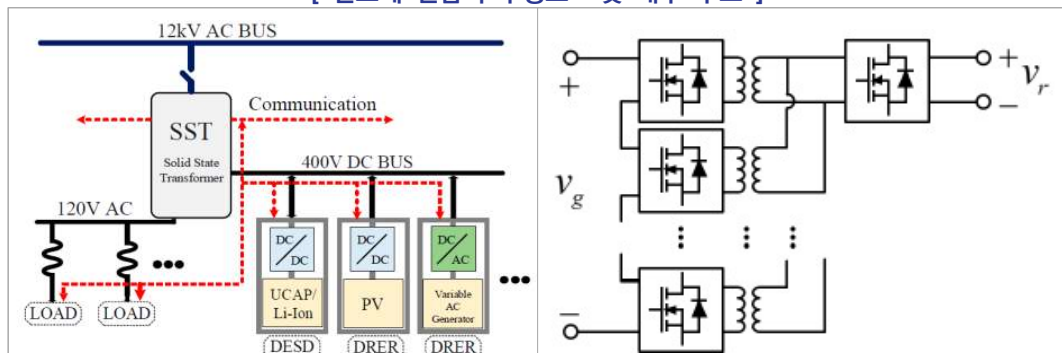
■ 반도체 변압기는 기존 변압기 성능의 한계를 극복하고 전력품질 개선이 가능한 모듈형 전력변환장치(서브모듈)들의 연결을 통해 구성된 초고압 대응 디지털 전력기기

- 2000년대 초반부터 미국을 중심으로 원천기술 연구가 진행되어 왔으며 최근 3.3kV, 10kV급 차세대 WBG\* 전력반도체가 개발됨에 따라 모듈 수를 획기적으로 줄인 반도체 변압기 상용화가 급속도로 진행 중
- \* WBG(Wide band gap) 전력반도체는 주로 SiC, GaN과 같은 물질을 이용하며 기존 Si 기반 전력반도체 대비 높은 전압내력, 빠른 반응성, 낮은 손실 등의 특징을 가짐
- 기존 배전급 변압기는 단순히 전압 변환을 통한 전력전달만을 목적으로 하며 수동적인 동작특성을 가지고 있어 전압, 전력, 전류 제어가 선형적으로 불가능
- 이러한 동작 특성으로 인해 분산전원 및 부하단 상황에 따라 역률 저하, 계통 고조파 유입 등 전력품질 저하가 발생할 수 있으며 특히, 신재생에너지원 등이 확대될 경우 계통 건전성을 확보하기 어려움
- 반도체 변압기는 배전급 계통단(우리나라의 경우 22.9kV)에 직접 연결되며 부하단에서 요구하는 DC 혹은 AC 전압을 모두 출력할 수 있고 신재생에너지 또는 ESS 연계시 계통으로 전력을 역전달하는 기능도 수행

[ 반도체 변압기의 주요 특징 ]

구 분	기존 변압기	반도체 변압기
배전 형태	교류 배전만 가능	직·교류 배전 가능
출력 전압 제어	출력 전압 제어 불가	능동적인 출력 전압 제어
전력 품질 보상	전력 품질 보상 불가	전력 품질 보상 가능
타 전력기기 연동	연계 불가	직류 링크를 이용한 연계
기술적 성숙도	매우 높음	기술 개발 단계
경제성	높은 편임	응용 분야별 차이

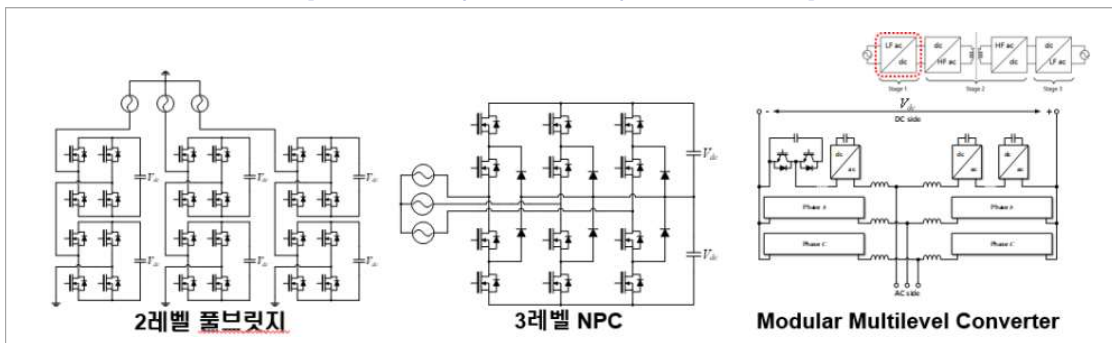
[ 반도체 변압기 구성도) 및 내부 구조 ]



7) The Advancement of Solid-State Transformer Technology and Its Operation and Control with Power Grids: A Review, 2022. 8, Mohammad Sazib Mollik, et al., electronics, MDPI

- 반도체 변압기는 배전계통에 연결되어 전력변환을 수행하는 고압 변환부(AFE스테이지), 절연을 담당하는 고주파 변압기 기반 절연부(DC-DC스테이지), 부하단 요구전압(DC 혹은 AC)을 생성하는 저압 변환부로 분류
- 구조에 따라 다양한 타입의 스테이지 구성이 가능하고 매트릭스 컨버터 등을 활용한 AC-AC 변환구조도 연구되었으나 최근에는 AC(고압)-DC(고압) 변환 ↔ DC(고압)-DC(저압) 변환 ↔ DC(저압) & AC(저압) 변환부로 구성된 3스테이지 구조를 주로 채택
- 전력변환부는 수kV 이내의 정격을 가지는 서브모듈의 직병렬 연결을 통해 구성되며 서브모듈의 토폴로지(회로)는 매트릭스 컨버터, 브릿지 컨버터 등 다양한 구조 적용 중
- 고압 전력변환부(AFE 스테이지)의 토폴로지는 크게 3가지로 분류되며 전력반도체 기술의 발달에 따라 Cascaded 구조의 Multilevel converter 토폴로지를 주로 적용 중
- 멀티레벨 토폴로지를 적용함으로써 전압 레벨수를 높일 경우 필터의 부피를 줄일 수 있어 통상적으로 2레벨 풀브릿지 컨버터를 직렬 연결한 cascaded Multilevel converter 적용
- 통상적으로 1.2kV~1.7kV 전압 정격의 WBG 전력반도체를 적용하고 있어 우리나라의 배전전압(22.9kV) 대응을 위해서는 최소 10개 이상의 서브모듈 연결이 필요하지만 최근 미국의 전력반도체 제조기업을 중심으로 3.3kV, 10kV급 SiC MOSFET이 개발되고 있어 서브모듈 수를 절반 이상 줄일 수 있을 것으로 기대

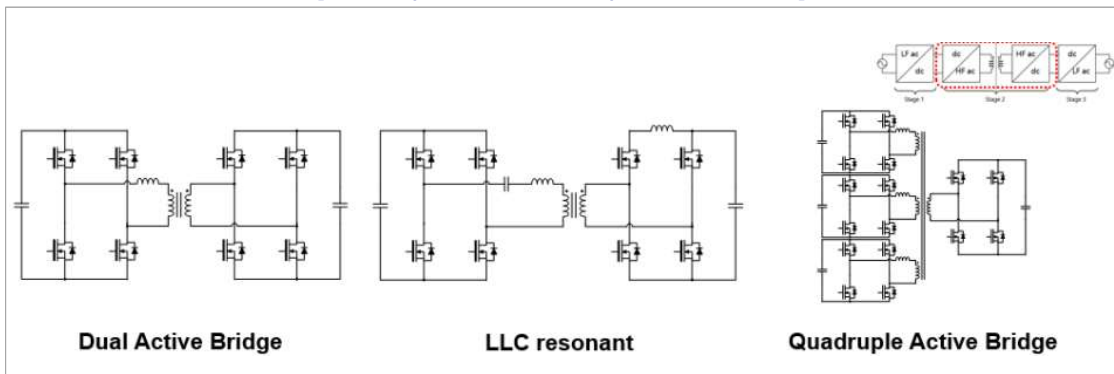
[ 고압 변환부(AFE 스테이지) 토폴로지 비교 ]



구 분	2레벨 풀브릿지	3레벨 NPC	MMC
스위칭 레벨 수(모듈수:N)	2N+1	4N+1	(N/2)+1
전력반도체 정격	V <sub>dc</sub>	V <sub>dc</sub> /2	V <sub>dc</sub> /2
모듈당전력반도체 개수	4	8+2(다이오드)	2
필터크기	작음	가장 작음	작음
제어구조	단순	단순	복잡
전압, 전류 THD 성능	좋음	가장 좋음	좋음

- 고주파 변압기 기반 절연부는 반도체 변압기의 절연을 담당하는 매우 중요한 스테이지로 고압 DC전압을 저압 DC전압으로 변환해주는 역할을 하며 절연형 DC-DC 컨버터 토폴로지를 주로 적용 중
- 절연은 고주파 변압기를 직접 설계하여 적용하며 수십kHz의 스위칭에서 주로 동작하기 때문에 코어, 권선 배치 등 정밀한 구조설계가 필수적
- 고주파 변압기의 절연내력 확보를 위한 절연매질의 특성 연구 및 수냉각방식 연구가 활발히 진행 중
- 최근에는 DAB, QAB와 같은 MAB(multiple active bridge) 토폴로지가 주로 적용되고 있는 추세

[ 절연부(DC-DC 스테이지) 토폴로지 비교 ]







구 분	DAB	LLC	QAB
전력밀도	높음	높음	가장 높음
전력반도체 개수	8	8	16
출력 전류 리플	큼	상대적으로 작음	큼
소프트 스위칭	제한적	전영역	제한적
효율	높음	높음	낮음
제어방식	위상천이 + PWM	주파수 변조	위상천이 + PWM

## ■ 주요 기능

- 양방향 전력변환 : 반도체 변압기는 입력, 출력에 있어서 양방향 전력변환이 가능하고 AC, DC에 모두 대응이 가능하기 때문에 다양한 전력계통망에 즉시 적용이 가능
- 무효전력 보상 : 부하 상황에 따라 입력 전류의 위상 제어로 계통에 무효전력을 보상할 수 있어 계통 역률 개선을 통한 전력전송 효율 향상
- 전력 조류 제어 : 유무효전력 보상을 통해 수용률 향상 및 설비 이용률 최적화가 가능
- 블랙스타팅 및 보호기능 : 정전 등 전력계통 이상 발생시 즉각적인 차단, 고장 허용 제어 등을 통한 보호기능 구현이 가능하고 배터리, 잔여전력 등을 활용한 초기기동(블랙스타팅) 제어 수행

## ■ 핵심 요소기술

### [ 반도체 변압기 핵심 요소기술 ]

<p><b>POWER ELECTRONICS</b></p> 	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 고압 토플로지</li> <li>● 고절연 시스템 구현</li> <li>● 고압 스위칭 구조</li> <li>● 게이트 드라이버</li> <li>● 파워서플라이</li> </ul>	<p><b>COMPONENTS</b></p> 	<ul style="list-style-type: none"> <li>● WBG 전력반도체</li> <li>● 고압 커패시터</li> <li>● 고압/고절연 센서류</li> <li>● 시스템 보호 및 접지</li> <li>● 고신뢰/소형/경량화</li> </ul>
<p><b>SYSTEM CONTROL</b></p> 	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 전압/전류 제어</li> <li>● 전력 평형 제어</li> <li>● 동작 시퀀스</li> <li>● 상위 시스템 연계</li> <li>● 고장 허용 운전</li> </ul>	<p><b>APPLICATIONS</b></p> 	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 교류/교류 배전</li> <li>● 교류/직류 배전</li> <li>● 신재생 연계</li> <li>● EV 급속 충전</li> <li>● 철도 차량 외</li> </ul>

## ■ 주요 적용 분야

- 전력계통 : 신재생에너지 등 분산에너지원을 Plug-and-play 방식으로 연결하는 FREEDM (Future Renewable Electric Energy Delivery and Management system)과 같은 차세대 배전시스템 구현
- 우리나라의 배전급 전압에 대응하는 반도체 변압기를 통해 계통 디지털화, 스마트화 가능하고 MVDC, LVDC 등 직류배전에도 적용이 가능

- 철도 : 유럽의 경우, 철도의 급전 주파수가 16.6Hz 정도로 철도용 변압기의 크기가 매우 크기 때문에 반도체 변압기로 대체 시 매우 높은 부피저감 효과를 가질 수 있음
- 전기차 충전스테이션 : 기존의 변압기+저압 컨버터 구조의 충전스테이션 시스템을 멀티포트 반도체 변압기로 대체하여 다양한 분산전원 적용을 통한 효과적인 경제적, 구조적 개선과 배터리 고전압/대전력 대응
- 데이터 센터 : 전력사용량이 매우 큰 데이터 센터는 효율성 및 안정성이 매우 중요하기 때문에 반도체 변압기 적용을 통한 전력품질 개선이 필요
- 해양 선박 및 항공 : 기존 엔진 기반의 선박 및 항공기의 전기식 전환 시 전력제어를 위한 반도체 변압기가 필수적이며 멀티포트 출력을 통한 다양한 분야 적용 가능

## ■ 개발 현황

[ 반도체 변압기의 개발 현황 ]

프로젝트/개발연도	개발기관/기업	적용분야	사양(전압/전력/스위칭주파수)
M2LC/2004	Siemens	RW, DPG	15kV/2MW/2.5kHz
UNIFLEX-PM/2009	ABB, 노팅엄 대학	DPG	3.3kV/300kVA
170kVA SST/2009	KTH	RW	170kVA/4kHz
SSPS/2011	GE, Cree	DPG	13.8kV/1MVA/20kHz
PET/2016	ABB	RW, DCG, DPG	15kV/1.2MVA/10kHz
EV용 SST/2016	Delta Elec.	EV	4.8kV/400kW
SPEED/2017	Oviedo Univ.	HG, DPG	6kV/105kW/30kHz
IUT/2016	Virginia Tech	DPG	7.2kV/25kW/93kHz
MEGALink/2019	ETH	DPG	10kV/630kVA
HEART/2019	Kiel univ.	HG, DPG	10kV/1MVA/20kHz
ASSTRA/2022	Eindhoven Univ., ABB	DCG	MV or LV/20kHz
MCT/2022	ETH	DCG, DPG	7kV DC/166kW/40kHz
TIGON/2024	CIRCE, PREMO	HG, DCG	3kV DC/300kW/83kHz

\* RW=Railway, DPG=Distribution power grid(MV-LV), DCG=DC grid integration, EV= EV charger, HG=Hybrid grid

## ② 하이브리드 반도체 변압기

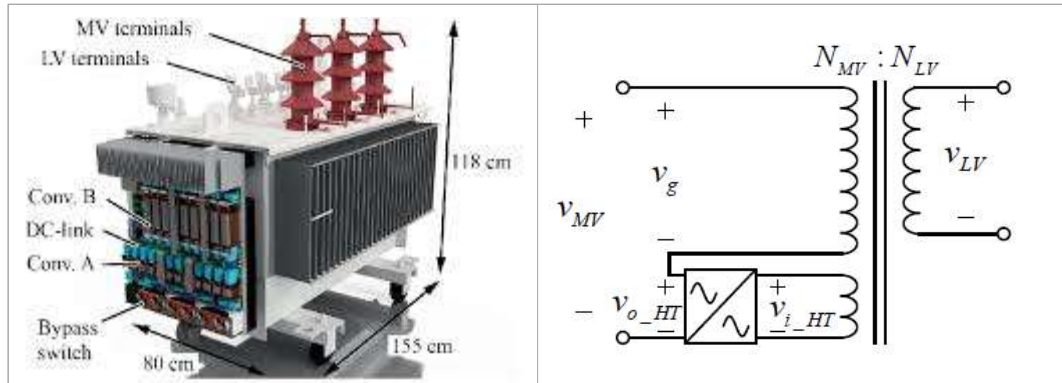
### ■ 하이브리드 반도체 변압기는 배전변압기의 1차측 혹은 2차측 권선 일부에 전력변환기를 연결한 구조로 선형적인 전압, 전류 제어가 가능한 디지털 전력기기

- 기존 변압기는 전송 거리에 따라 발생하는 전압강하의 문제를 해결하기 위해 탭 절환기(Tap changer)를 사용하고 있으나 전압 제어의 범위가 한정적이며 선형적인 제어가 어렵고 동작시 소음, 전력손실 등을 야기
- 하이브리드 반도체 변압기는 반도체 변압기와 마찬가지로 계통 순간 전압 상승/강하 보상, 계통 역률 보상, 유·무효전력 제어, 고조파 전류 보상 등의 기능을 수행
- 하이브리드 반도체 변압기는 기존 배전계통 인프라를 그대로 사용할 수 있어 초기 투자비용이 적어 실용성과 경제성이 높으며 낮은 전압의 전력반도체 스위칭 소자를 적용할 수 있어 신뢰성을 높일 수 있음
- 배전 변압기의 일부 전압만을 전력변환기가 감당하기 때문에 낮은 정격전력의 시스템 설계가 가능(통상적으로 변압기 정격의 8~10% 내외)
- 전력변환기가 배전 변압기에 연결되는 구조에 따라 요구되는 전기적 절연 성능이 높을 수 있고 배전계통 전압의 일부만을 제어하기 때문에 제어 가능 범위가 반도체 변압기에 비해 좁다는 단점을 가지고 있음
- 2000년대 초부터 미국을 중심으로 Sen TR, HDT(Hybrid distribution transformer), NGT(Next generation transformer), UPFC(Unified power flow controller), CNT(Controllable network transformer)와 같은 다양한 이름으로 여러가지 구조와 토폴로지, 제어 알고리즘의 연구가 진행 중

[ 하이브리드 반도체 변압기의 주요 특징 ]

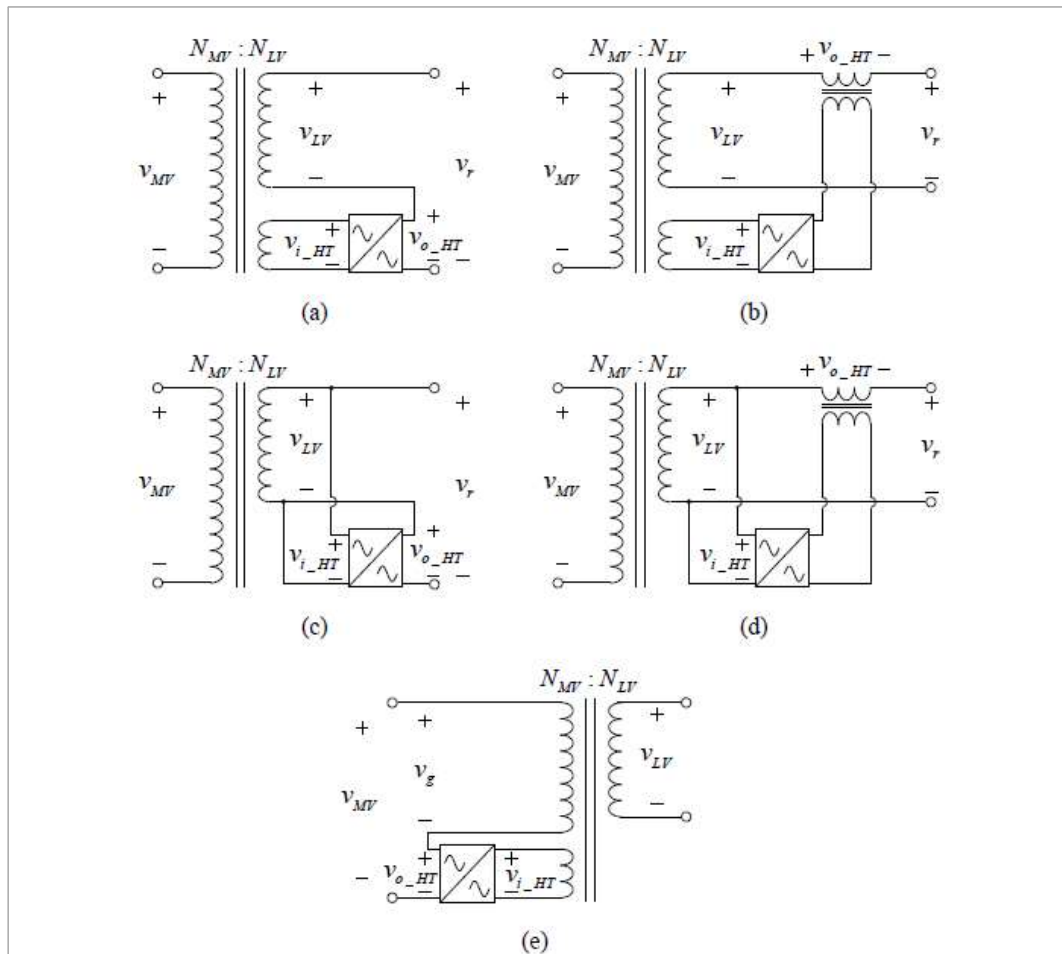
구 분	기존 변압기	반도체 변압기
배전 형태	교류 배전만 가능	교류 배전만 가능
출력 전압 형태/제어	단일AC/제어 불가	다단AC/제어 가능
전력 품질 보상	전력 품질 보상 불가	전력 품질 보상 가능
타 전력기기 연동	연계 불가	구조에 따라 가능
기술적 성숙도	매우 높음	기술 개발 속도 빠름
경제성	높음	비교적 높음

[ 하이브리드 반도체 변압기<sup>8)</sup> 및 내부 구조 ]



- 하이브리드 반도체 변압기는 전력변환기가 탭변압기에 연결되는 형태 혹은 회로구조에 따라 분류할 수 있으며 각 구조의 특성에 따라 최적의 구조를 적용

[ 전력변환기 연결방식에 따른 하이브리드 반도체 변압기 구조 ]



8) Hybrid Transformers for Power Quality Enhancements in Distribution Grids—Comparison to Alternative Concepts, 2020, J. Burkard, J. Biela, Engineering, Environmental Science

## ■ 주요 기능

- 전압 보상 : 권선 일부 전압을 입력으로 하여 승·강압 한 출력전압을 계통으로 보상하기 때문에 선형적이고 안정적인 전압 보상이 가능
- 무효전력 보상 : 정격의 10% 내외의 무효전력 보상이 가능하며 유·무효전력의 독립제어가 가능
- 전력 조류 제어 : 제한된 영역\* 내에서 무효전력 독립 제어를 통해 양방향 전력 조류 제어가 가능
- \* 전력변환기에 연결된 변압기 권선의 전체 대비 비율에 따라 보상 영역이 결정됨
- 역률 보상 : 직류링크가 있는 전력변환기 구조 채택시 제한된 영역 내에서 계통 역률 보상 가능

### [ 전력변환기 연결방식에 따른 하이브리드 반도체 변압기 구조 ]

<p><b>POWER ELECTRONICS</b></p> 	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 고승압 토폴로지</li> <li>● 고절연 시스템 구현</li> <li>● 고압 스위칭 구조</li> <li>● 게이트 드라이버</li> <li>● 파워서플라이</li> </ul>	<p><b>COMPONENTS</b></p> 	<ul style="list-style-type: none"> <li>● WBG 전력반도체</li> <li>● 변압기 코어, 권선</li> <li>● 고압/고절연 센서류</li> <li>● 시스템 보호 및 접지</li> <li>● 고신뢰/소형/경량화</li> </ul>
<p><b>SYSTEM CONTROL</b></p> 	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 전압/전류 제어</li> <li>● 무효전력 보상</li> <li>● 전력조류제어</li> <li>● 상위 시스템 연계</li> <li>● 역률 보상</li> </ul>	<p><b>APPLICATIONS</b></p> 	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 교류/교류 배전</li> <li>● 철도 차량</li> <li>● 신재생 연계</li> <li>● 선박 외</li> </ul>

## ■ 적용 분야

- 전력계통 : 기존 배전급 변압기에 즉시 적용이 가능하여 반도체 변압기 활성화 전 중간단계로서의 계통 디지털화 가능
- 철도 : 철도 차량용 변압기에 적용하여 구간에 따른 전압 최적 제어 및 역률 제어를 통한 에너지 효율화
- 해양 선박 및 항공 : 기존 엔진 기반의 선박 및 항공기의 한정적 에너지를 효율적으로 사용하기 위한 하이브리드 반도체 변압기 적용

■ 개발 현황

[ 반도체 변압기의 개발 현황 ]

시스템	구조	기능	특징
NGT	탭변압기+AC 초퍼	<ul style="list-style-type: none"> <li>수전단 전압제어</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>1차측 컨버터 연결구조</li> <li>2차측 전체전압 보상</li> </ul>
Sen TR	탭변압기 + 탭절환기	<ul style="list-style-type: none"> <li>수전단 전압제어</li> <li>전력 조류 제어</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>탭 절환기의 전기적 제어</li> </ul>
CNT	탭변압기+AC 초퍼	<ul style="list-style-type: none"> <li>수전단 전압제어</li> <li>전력 조류 제어</li> <li>전류 고조파 보상</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>1차측 컨버터 연결구조</li> <li>직류단 없는 단일 스테이지</li> <li>계통측 전류&amp;역률제어 불가</li> </ul>
HT	탭변압기+Matrix conv.	<ul style="list-style-type: none"> <li>수전단 전압제어</li> <li>전력 조류 제어</li> <li>역률 제어</li> <li>상단락 고장제어</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>2차측 컨버터 연결구조</li> <li>직류단 없는 단일 스테이지</li> <li>계통측 역률제어 불가</li> </ul>
SVR	탭변압기+BTB conv.	<ul style="list-style-type: none"> <li>수전단 전압제어</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>2차측 컨버터 연결구조</li> <li>3스테이지 백투백 컨버터 (절연형 컨버터 적용)</li> </ul>
UPFC	커플링 변압기+컨버터	<ul style="list-style-type: none"> <li>수전단 전압제어</li> <li>전력 조류 제어</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>별도의 추가 변압기 적용</li> <li>계통 무효전력 주입 가능</li> </ul>
HEUPFC	Sen TR + UPFC	<ul style="list-style-type: none"> <li>수전단 전압제어</li> <li>전력 조류 제어</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Sen TR + UPFC 구조로 제어성능 향상</li> </ul>
HDT	탭변압기+BTB conv.	<ul style="list-style-type: none"> <li>수전단 전압제어</li> <li>전류 고조파 보상</li> <li>역률 제어</li> <li>상전류 불평형 보상</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>1,2차측 탭이 모두 구성된 탭변압기 적용</li> <li>1,2차측 제어 모두 가능</li> </ul>
PSST	탭변압기+AC/AC MMC	<ul style="list-style-type: none"> <li>수전단 전압제어</li> <li>전력 조류 제어</li> <li>전류 고조파 보상</li> <li>상전류 불평형 보상</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>탭변압기+Injection TR 추가 구성</li> <li>총 3개의 MMC로 구성</li> </ul>
CPAT	Customized tap TR+BTB conv.	<ul style="list-style-type: none"> <li>수전단 전압제어</li> <li>전력 조류 제어</li> <li>전류 고조파 보상</li> <li>역률 제어</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>정격에 맞춰 설계된 변압기 별도 적용</li> <li>변압기 권선은 상별 분리, 코어 공유 (자기적 결합, 전기적 절연)</li> </ul>
HSST	탭변압기+멀티레벨 컨버터	<ul style="list-style-type: none"> <li>수전단 전압제어</li> <li>전력 조류 제어</li> <li>역률 제어</li> <li>전류 고조파 보상</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>1차측 컨버터 연결구조</li> <li>탭 권선의 1/2로 구현 가능</li> <li>멀티레벨 컨버터 적용</li> </ul>

## IV. 결론 및 시사점

### ■ 전세계적으로 지속가능한 탄소중립이 이슈가 제시되고 있고 전산업 분야에 걸쳐 디지털화가 진행되고 있는 시점에서 전력산업의 디지털화 달성을 위한 기기단위부터의 대응이 필요

- 디지털 전력기기는 전세계적 탄소중립 이슈와 전력산업 디지털화, 에너지 고효율화에 대응하기 위한 필수 기기로의 의미가 있음
- 전력산업 플랫폼 단위의 디지털화는 연간 800달러 절약 및 발전비용의 5% 감소가 가능하다고 평가<sup>9)</sup>되고 있으나 디지털 전환에 따른 전력변환·전달 등을 직접 수행하는 전력기기의 디지털화는 미비한 상황
- 전력기기의 디지털화는 에너지 효율화, 온실가스 저감 등 계통의 전력품질 개선을 통해 계통 운영자 및 실 사용자에게 직접적인 경제적, 사회적 비용 절감 효과를 얻을 수 있음
- 현재 전력산업 디지털화는 소프트웨어 중심의 전환이 이루어지고 있으나 전력기기와 같은 하드웨어 산업의 디지털화 추진은 미비한 상황으로 중장기적인 계획 수립 필요
- 산업적으로 미국, 유럽 등의 디지털 전력기기 및 운영기술을 추격하는 단계인 국내기업의 경쟁력 강화를 위해 전력산업 관련 기업에게 디지털 기술을 접목하고 육성하는 범정부적 차원의 지원이 필요

### ■ 전력 계통망의 유연화와 스마트화 시스템 구축을 위해 수동적인 동작을 보이는 기존 전력기기에서 기기 자체의 능동 디지털 제어와 상위 통신이 연계가 실시간으로 가능한 디지털 전력기기 개발 필요

- 향후 전기차 충전인프라, 마이크로그리드, 신재생에너지, ESS 등 다양한 전력원의 계통 접속에 따른 전력품질 개선과 고장 억제 등을 위한 기기 단위 디지털화 기술개발 필요
- 디지털 전력기기는 계통 주파수 불균형, 역률 저하, 무효전력 증가 등에 대해 전력변환 단계에서 대응이 가능한 원천기술

### ■ 최근 DC송배전, 분산전원 확대 등 기존 전력기기의 상대적 취약기술인 제어, 통신, 고효율 전력변환 등에 디지털화 기술 접목을 통해 새로운 기술 패러다임에 대응 필요

- 국내기업의 연구개발 역량을 활용하여 차세대 디지털 전력기기의 핵심 원천기술을 확보하고 글로벌 선진사 대비 기술격차 해소가 시급
- 디지털 전력기기 기술은 아직 초기 성장기로 글로벌 선진사에서 일부 상용화가 이루어진 상황이기 때문에 선제적 대응을 통한 기술경쟁력 확보가 필요

9) 에너지 산업의 디지털화(Digitalization)가 가져올 미래, 2019.01, 삼성KPMG 경제연구원

■ **디지털 전력기기는 변압기와 전력변환기의 결합 형태의 구조로 기술적으로 타 전력기기 응용이 가능하며 확장성이 높음**

- 변압기의 전압제어 뿐만 아니라 차단기, 스위치기어 등 타 전력기기에 대해 부가 기능을 구현함에 있어 전력변환기를 응용·적용 가능
- 역률 제어 및 고조파 저감을 통해 계통과 부하간 혹은 계통간 간섭을 최소화시키고 무효전력 보상을 통해 에너지 절감 및 전력수급 최적화 가능
- 직류 변환에 필요한 관련 타 산업에 파급효과가 예상되어 국내 전력산업의 고도화에 기여
- \* '관련 사업 : EV 급속 충전스테이션, DC 빌딩, 데이터센터, PV/ESS, 전기 추진선박 등

■ **중소 소재 및 부품기업의 기업역량 확보를 통한 전력기기 디지털 기술 전환은 전기산업에 新성장동력을 창출하여 국내 Value-Chain 환경 조성 가능**

- 대기업(플랫폼화)-중소기업(부품·소재)간 유기적인 협업체계 구축 필요
- 정부의 기업투자 유인 정책 및 역할 수행이 필요하며 중장기적 R&D 지원 계획 수립 필요

## 참고문헌

1. 제3차 지능형전력망 기본계획(2023. 2. 14)
2. 제10차 전력수급기본계획(2023. 1. 13)
3. THE WORLD MARKET FOR TRANSMISSION & DISTRIBUTION EQUIPMENT AND SYSTEMS 2018 - 2028 (2019, GOULDEN REPORTS)
4. 에너지 산업의 디지털화(Digitalization)가 가져올 미래 (2019, 삼성KPMG)
5. 주요국 탄소중립 기술정책 동향(2021, 녹색기술센터)
6. 디지털 탄소중립형 전력기기 기술동향(2023, KEIT 이슈리뷰)
7. 전력기기의 지능화를 위한 디지털 변전소 동향 및 발전방향(2022, KEIT 이슈리뷰)
8. TC 동향보고서(TC17) (2021, 전기연구원)
9. 디지털변전소 시장(글로벌 시장동향보고서)(2021, 연구개발특구진흥재단)
10. 전력반도체 시장 동향 및 전망(2023, KDB 미래전략연구소)
11. 화합물 전력반도체(2023, KISTEP)
12. 탄소중립 산업핵심기술개발(전기전자)(2021, 산업통상자원부)
13. 저압 직류 배전용 SST 원천기술 연구-양방향 AFE 컨버터 단일 모듈 연구(2020, 산업통상자원부)
14. 배전계통 전력품질 보상을 위한 10kVA급 13.2kV/220V 능동형 하이브리드 반도체 변압기 개발 (2020, 한국전력공사)
15. 직류배전기술의 요소기술 개발사례 및 시장전망 세미나 자료(김정훈)
16. 전력계통 구성도 및 관제시스템(한전 계통계획처)
17. 탄소중립 시대, 전력산업 미래와 한전의 기술개발 전략(2022, 한국전력공사)
18. 주요국 신재생에너지 지원제도 현황 및 변화과정(2021.7, 전기저널)
19. The Advancement of Solid-State Transformer Technology and Its Operation and Control with Power Grids: A Review, Mohammad Sazib Mollik, et al., (electronics, MDPI,2022. 8)
20. Hybrid Transformers for Power Quality Enhancements in Distribution Grids-Comparison to Alternative Concepts, J. Burkard, J. Biela, (Engineering, Environmental Science, 2020)