

2026 VLSI Review

단국대학교 파운드리공학과 석사과정 장준서

Session 11 : Wireless Power Transfer & Energy Harvesting Interfaces

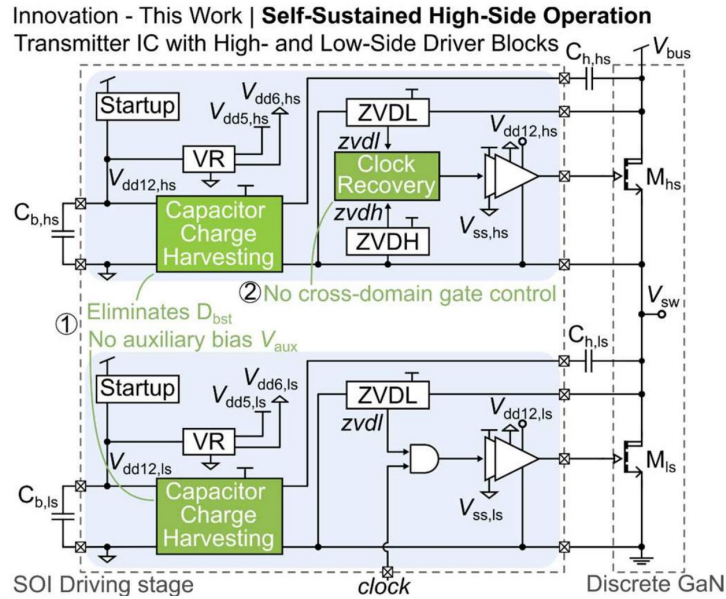
이번 2026 VLSI의 Session 11에서는 무선전력전송과 에너지 하베스팅을 주제로 5편의 논문이 발표되었다. 효율 향상과 함께 구동 회로의 단순화와 입력 조건에 따른 적응형 제어기가 주요 경향으로 나타났다. 본 리뷰에서는 이러한 방향을 대표하는 Class-D 송신기(C11.1)와 머신러닝 기반 압전 하베스팅 인터페이스(C11.5)를 살펴본다.

#11-1 Leibniz University Hannover에서 발표한 논문으로, 보조 전원과 레벨 시프터 없이 동작하는 6.78 MHz Class-D 송신기를 제안하였다. 기존 구조에서는 고측 스위치의 부유 전원과 전압 영역 간 제어 신호 전달이 필요하여 고주파 구동 회로의 복잡도와 손실이 증가한다.

그림 1의 송신기는 스위칭 노드의 상승 및 하강 에지에서 전하를 회수하여 고측과 저측 드라이버의 바이어스를 공급한다. 한쪽 에지만 이용할 때보다 주기당 회수 전하가 증가하여 필요한 커패시터 크기를 줄일 수 있으며, 보조 전원과 부트스트랩 다이오드도 제거하였다.

고측 클록은 스위칭 노드의 전압을 감지하여 복원한다. 저측 동작 시간을 감지용 커패시터에 기록하고 고측 타이밍 생성에 활용해 레벨 시프터를 제거하였다. DC 버스와 하나의 외부 클록만으로 기동 및 정상 동작이 가능하다.

0.18 μm SOI 공정의 드라이버와 외부 GaN 스위치로 구현한 시스템은 48 V 입력 및 40 mm 전송 거리에서 최대 25 W 출력과 91%의 피크 DC-DC 효율을 달성하였다. 스위칭 파형을 바이어스와 타이밍 생성에 함께 활용한 점이 특징이다.



[그림 1] 자체 바이어스 및 고측 클록 복원을 이용한 Class-D 송신기 구조

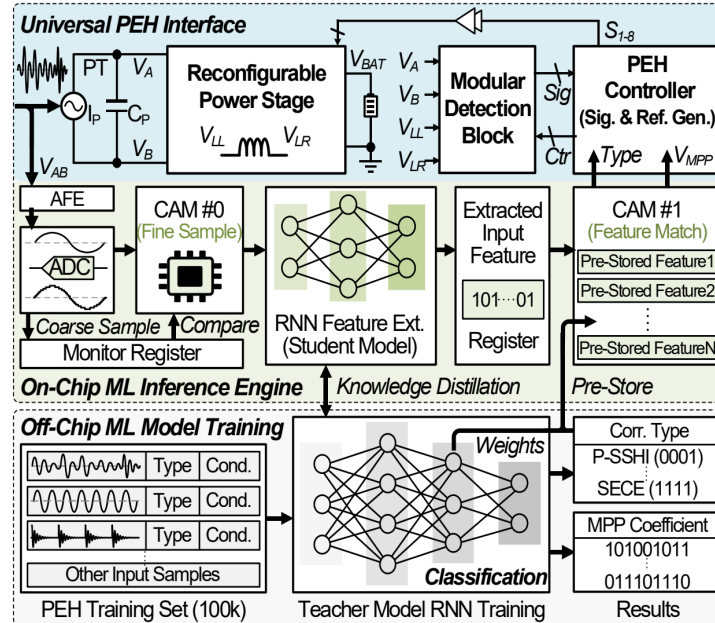
#11-5 University of Macau에서 발표한 논문으로, 머신러닝 기반 입력 식별과 토폴로지 간 최대 전력점 추적을 결합한 압전 하베스팅 인터페이스를 제안하였다. 주기 진동과 충격, 다차원 진동은 입력 파형이 달라 하나의 토폴로지로 모든 조건에서 높은 출력을 얻기 어렵다.

기존의 최대 전력점 추적(MPPT)이 정해진 토폴로지 안에서 동작점을 조절하는 데 비해, 본 논문에서는 입력을 식별하여 토폴로지와 최대 전력점 계수를 함께 선택한다. 입력 조건에 따라 에너지 추출 방식 자체를 바꿀 수 있는 구조이다.

그림 2와 같이 모델의 학습은 칩 외부에서 수행하며, 칩 내부에서는 순환 신경망(RNN)을 이용해 입력 파형의 특징을 추출한다. 추출한 특징을 내용 주소화 메모리(CAM)에 저장된 정보와 비교하여 토폴로지 및 최대 전력점 계수를 결정한다. 재구성 가능한 전력단은 8개의 스위치와 하나의 인덕터로 구성되며, 전하 추출과 전압 반전 등의 동작을 조합하여 선택된 토폴로지를 구현한다.

입력 식별에 필요한 에너지를 줄이기 위해 기동 시에는 파형을 정밀하게 분석하고, 정상 상태에서는 그 길이의 1/5에 해당하는 구간만 관찰한다. 입력이 유지되면 기존 토폴로지와 동작점을 그대로 사용하여 특징 추출과 개방 회로 전압 탐색을 생략한다. 이를 통해 한 번의 입력 식별에 소모되는 에너지를 정밀 식별 대비 최대 59% 절감하였다.

180 nm 공정으로 제작된 칩은 주기 진동, 충격 및 다차원 진동에 따라 서로 다른 에너지 추출 방식으로 동작함을 보였다. 해당 연구는 머신러닝의 판단 결과를 실제 전력단 재구성과 연결하고, 정상 상태의 판단 비용까지 줄여 다양한 진동 환경에 대응하도록 구성한 점이 특징이다.



[그림 2] 입력 식별 및 토폴로지 선택을 위한 범용 압전 하베스팅 인터페이스

두 연구는 각각 스위칭 파형을 재활용한 구동 회로 단순화와 입력 분석에 기반한 전력단 재구성을 제안하였다. 전력 변환을 보조하는 회로와 제어 방식까지 함께 개선한다는 점에서 이번 세션의 설계 방향을 보여준다.

저자정보



장준서 석사과정 대학원생

- 소속 : 단국대학교
- 연구분야 : AFE 설계
- 이메일 : cah7781@naver.com
- 홈페이지 : <https://sites.google.com/dankook.ac.kr/acs-lab/home>