

2025 IEEE VLSI Review

한국과학기술원 바이오및뇌공학과 박사과정 석동열

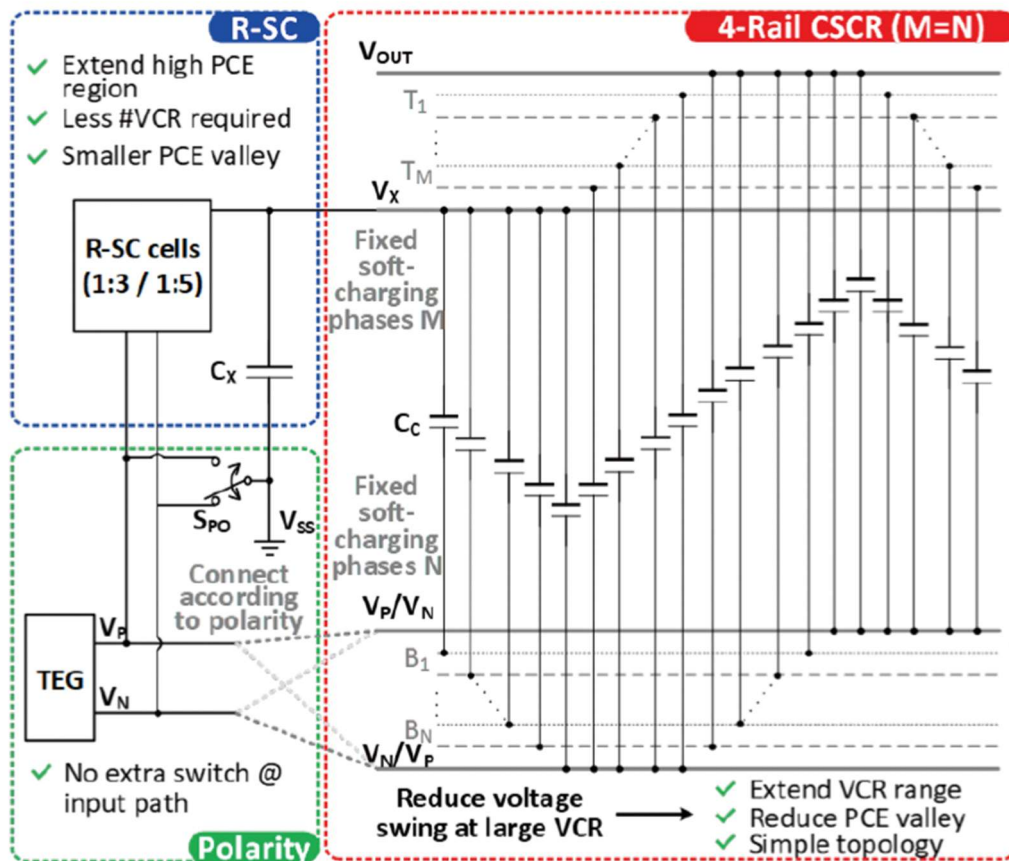
Session 3 Energy Harvesting

이번 세션에서는 다양한 환경에서 초저전력 장치를 구동하기 위한 첨단 에너지 하베스팅 기술들이 소개되었다. C3-1에서는 온도 변화에 따라 입력 극성이 바뀌는 열전발전 소자를 위해, 양극성을 지원하며 폭넓은 전압 변환 비율을 제공하는 완전 통합형 하이브리드 SC 전력 변환기를 제안하였다. C3-2는 해양 에너지 환경의 저주파 특성을 고려하여, 다단 바이어스-플립 구조와 액티브 정류기를 결합한 TENG 기반 에너지 하베스터로 최대 77.7%의 효율을 달성하였다. C3-3에서는 다중 RF 소스를 동시에 활용하는 3D MPPT 기반 하베스팅 시스템을 통해 높은 감도와 넓은 입력 전력 범위를 확보하여 IoT 등 무선 센서 네트워크에 최적화된 솔루션을 제시했다. 마지막으로 C3-4는 세 가지 에너지원(PZT, PV, TEG)을 동시에 처리하는 TGPR 하베스터를 통해 기존 대비 2,771% 향상된 출력 전력을 보여주며, 다양한 에너지원 통합의 가능성을 입증했다. 이처럼 이번 세션의 연구들은 각각의 특화된 환경에서 에너지 수확의 효율성과 확장성을 극대화하며, 차세대 자율형 전자 시스템 구축에 기여할 수 있음을 보여준다.

#C3-1 본 논문은 열전발전기(TEG) 기반의 에너지 하베스팅을 위해 양극성 입력을 지원하고 넓은 전압 변환 비율(VCR)을 처리할 수 있는 완전 통합형 스위치드 캐패시터(SC) 전력 변환기를 제안한다. TEG의 출력 전압은 온도 변화와 방향에 따라 -1V에서 +1V까지 넓게 변동하는데, 기존 SC 기반 변환기는 단극성 입력만 지원해 입력 극성이 바뀌면 동작이 불가능하거나 복잡한 추가 회로가 필요했다. 또한 기존 구조는 VCR 범위가 제한적이어서 효율적인 전력 변환이 어려웠다. 이를 해결하기 위해 본 논문은 Dickson R-SC와 4-레일 CSCR(Continuously Scalable Conversion Ratio)을 결합한 하이브리드 구조를 제안하였다. Dickson R-SC가 생성한 중간 전압(VX)을 통해 CSCR의 전압 스윙을 줄여 충전 손실을 낮추고, CSCR은 연속적이고 부드러운 다단 전압 변환으로 높은 효율을 유지한다. 별도의 스위치 없이도 양극성 입력을 실시간으로 감지해 전환하며, 1kHz 샘플링으로 극성을 판단해 자동으로 최대 전력점을 추적(MPPT)한다.

칩은 180nm BCD 공정으로 제작되었으며, $\pm 130\text{mV}$ 의 낮은 입력 전압에서도 동작 가능하다. 출력은 항상 1.2V로 안정화되고, $-6.48 \sim +6.67$ 범위의 VCR에서 75% 이상의 효율을 유지하며, 최대 효율은 84%를 기록했다. 또한 130Ω 의 TEG 내부 저항에서 1.31mW, 34Ω 에서는 10.8mW의 출력 전력을 달성했다. 완전 CMOS 기반으로 구현되어 소형화에 적합하며, IoT와 웨어러블 등 환경 변화가 심한 자율형 시스템에서 안정적이고 효율적인 전력

공급을 가능하게 한다.

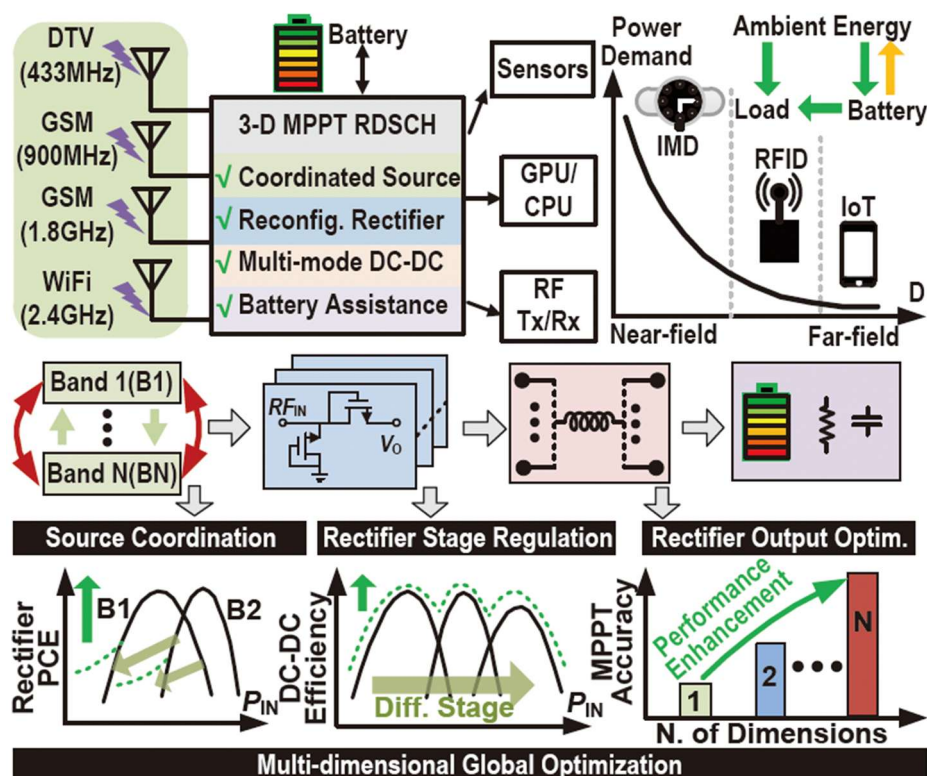


[그림 1] 제안된 재구성 가능한 하이브리드 Dickson-CSCR 전력 변환기의 시스템 아키텍처를 보여 준다. Dickson R-SC 블록과 4-레일 CSCR 블록으로 구성되며, 두 블록이 결합되어 양극성 입력을 동시에 처리하고 넓은 전압 변환 비율(VCR)을 지원한다. 중간 전압(V_x)은 Dickson R-SC에서 생성되어 CSCR의 전압 스윙을 줄이고 충전 손실 감소시킨다. 또한, AC 입력 극성 변화에 실시간으로 대응하며, 단일 칩 내에서 최대 전력지점 추적과 안정적인 전력 출력을 동시에 구현할 수 있다.

#C3-3 본 논문은 IoT, 웨어러블 기기, 무선 센서 네트워크(WSN) 등 배터리 교체가 어렵거나 불가능한 초저전력 장치를 위해 두 개의 RF 에너지원으로부터 동시에 전력을 수확할 수 있는 차세대 RF 에너지 하베스팅 시스템을 제안한다. 기존 RF 하베스터는 단일 주파수만 처리할 수 있어 특정 밴드에 신호가 없으면 전력 공급이 불가능하며, 여러 RF 소스를 동시에 사용할 경우 간섭으로 인해 효율이 저하되는 문제가 있었다. 또한 고정된 회로 구조와 단순한 MPPT(Maximum Power Point Tracking) 제어로는 입력 전력의 변화에 즉각 대응하기 어려워 안정적인 전력 공급이 힘들었다. 이를 해결하기 위해 제안된 시스템은 세 가지 측면에서 전역 최적화(global optimization)를 수행한다.

첫째, 에너지원 간 조율(Energy Source Coordination Control)을 통해 두 RF 소스가 서로 간섭하지 않으면서 전력을 최대한 효율적으로 결합하도록 관리한다. 둘째, 정류기 출력 최적화(Rectifier Output Optimization)를 통해 입력 신호의 크기와 조건에 따라 정류기의 동작 방식을 실시간으로 조정하여 다양한 입력 상황에서도 최적의 효율을 유지한다. 셋째, 정류기 단계 제어(Rectifier Stage Regulation)를 통해 다단계 DC-DC 컨버터를 활용하여 넓은 입력 전압 범위에서도 일정하고 안정적인 출력 전압을 제공한다.

이를 구현하기 위해 시스템은 재구성 가능한 정류기(Reconfigurable Rectifier)와 다단계 DC-DC 컨버터를 사용하며, 두 RF 입력의 전압·전류·출력을 동시에 고려하는 제어 알고리즘을 적용한다. 그 결과 -24.1 dBm의 매우 낮은 입력 전력에서도 동작이 가능하며, 최대 71%의 전력 변환 효율(PCE)을 달성했다. 실험에서 두 RF 소스를 동시에 사용했을 때 단일 소스 대비 더 안정적이고 지속적인 전력 공급이 가능함이 입증되었으며, 이는 스마트 시티 센서, 산업용 모니터링 시스템 등 배터리 없는 자율 전력 공급이 필요한 다양한 응용 분야에서 활용 가능성이 높다.



[그림 2] 제안된 3차원 MPPT 이중 밴드 RF 에너지 하베스터의 개념도

저자정보



석동열 박사과정 대학원생

- 소속 : 한국과학기술원
- 연구분야 : 바이오메디컬 응용 회로설계(센서 및 신호처리)
- 이메일 : sukd10@kaist.ac.kr

2025 IEEE VLSI Review

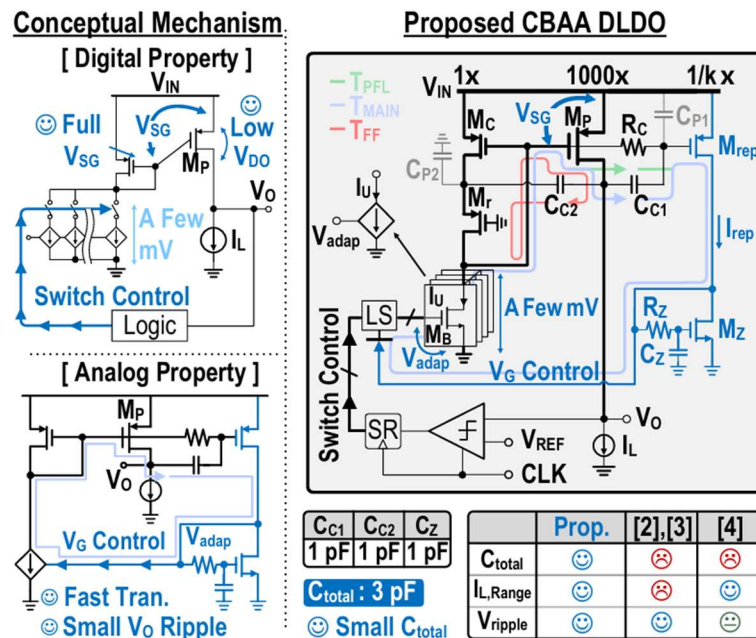
단국대학교 파운드리공학과 석사과정 조혁준

Session 18 Power Management

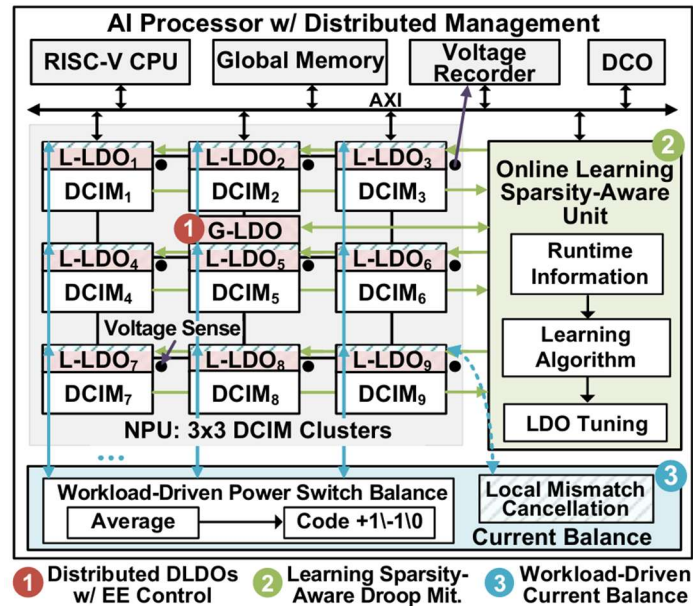
Session 18에서는 전력 관리를 주제로 총 5편의 논문이 발표되었다. 발표된 논문들은 각각 RF 시스템을 위한 Supply Modulator, LED Driver, Buck Regulator, AI 프로세서를 위한 전력 관리 시스템 그리고 DLDO를 주제로 각각 한 편씩 발표되었다. 이 논문들은 공통적으로 시스템에 안정적인 전력 및 전압을 공급하기 위한 기술적 과제에 집중한다. 급격한 부하 변화 시 발생하는 전압 강하나 리플과 같은 전압 변동 문제를 최소화하고, 각 회로의 특성에 맞춰 전압 안정성을 향상시키는 방향으로 연구가 진행되고 있음을 확인할 수 있다. 이러한 흐름 속에서, 저전압·고효율이 중요한 최신 프로세서를 위한 전력 관리 기술이 주목받고 있다. 이에 따라 발표된 논문 중 DLDO 회로 자체에 대한 논문 1편과 AI 프로세서 시스템을 위한 LDO 관리 기술 논문 1편을 더 깊이 있게 살펴보고자 한다.

#18-1 본 논문은 서강대학교에서 발표한 논문으로, 최근 SoC의 공급 전압이 점차 낮아짐에 따라 저전압 환경에서 동작 가능한 LDO의 중요성이 부각되고 있다. 기존 아날로그 LDO는 전압 헤드룸 제약으로 인해 저전압 환경에 적용하기 어렵지만, 디지털 LDO(DLDO)는 낮은 입력 전압에서도 동작이 가능하다는 장점을 갖는다. 그러나 DLDO는 고주파 클럭이나 큰 부하 커패시터가 없을 경우 출력 전압 리플(ripple)과 심각한 언더슈트(undershoot) 문제를 일으키는 한계가 존재한다. 이를 해결하기 위해 논문에서는 전류 미러 기반 아날로그 보조(CBAA) 방식을 적용한 새로운 DLDO 구조를 제안한다. 그림 1은 제안된 DLDO를 보여준다. 이 방식은 버퍼 트랜지스터(M_B)의 수를 디지털 방식으로 제어하며, M_B 는 딥 트라이오드 영역에서 동작하기 때문에 V_{DS} 가 매우 작은 값만 필요하다. 이로 인해 M_P 의 V_{GS} 의 제한이 사라져 헤드룸 문제가 해결된다. 또한 고주파 AC 루프가 과도 상태를 보상하며, 구조적으로 기생 커패시턴스의 낮은 노드에 커플링 커패시터를 연결하여 전체 커패시턴스를 최소화한다. DC 관점에서 레플리카 회로는 부하 전류에 비례하는 전류를 생성해 제어 전압을 부하 전류에 맞춰 조절한다. 이 과정에서 단위 전류가 동적으로 변화하여, 기존 구조의 한계였던 작은 부하에서의 리플 문제와 큰 부하에서의 전류 부족 문제를 동시에 해결한다. AC 관점에서는 출력 전압에 언더슈트가 발생하면 커플링 커패시터를 통해 V_C 가 그에 맞춰 떨어지고, 이는 제어 전압 상승으로 출력 전류가 증가해 보상된다. M_Z , R_Z , C_Z 로 구성된 액티브 제로(A_Z) 회로는 과도 상태가 발생했을

#18-2 본 논문은 베이징대학교에서 발표된 논문으로, AI 컴퓨팅의 핵심인 AI 프로세서 및 가속기의 고질적인 전력 관리 문제 해결에 초점을 맞췄다. AI 프로세서는 대규모 병렬 MAC(곱셈-누산) 연산 과정에서 수 암페어(ampere) 수준의 과도 전류가 발생해 전압이 급격히 강하하며, 이는 칩의 안정성을 위협하는 주요 요인으로 작용한다. 또한 실제 AI 모델은 높은 희소성(sparsity)을 가지지만, 희소성이 낮은 상황을 가정해 전압을 공급하기 때문에 불필요한 전력 낭비가 발생한다. 더불어 AI 프로세서는 하나의 LDO가 전체 전력을 담당하는 방식이 아니라 칩 내 여러 구역에 다수의 LDO를 배치하는 구조를 사용한다. 이 경우 LDO 간 작업량이 불균형 하게 분배돼 일부 LDO는 과부하에 걸리고, 나머지는 유휴 상태로 남아 전체 시스템의 전력 전달 효율을 저하시키는 문제가 뒤따른다. 이 같은 문제를 해결하기 위해, 논문은 지능형 분산 전력 관리 시스템을 제안한다. 우선 과도 전류로 인한 전압 강하에 신속히 대응하기 위해 '이중 제어 시스템'을 도입했다. 평상시에는 Global-LDO(G-LDO)가 시스템 전체를 제어하고, 급격한 전압 강하가 발생하면 각 구역의 Local-LDO(L-LDO)가 즉시 전압을 복구하는 방식이다. 또한 희소성 문제 해결을 위해 연산 희소성과 토글률을 실시간으로 모니터링하고, 이로부터 발생하는 전압 강하 데이터를 학습 보상에 활용한다. 그 결과 L-LDO의 기준 전압을 동적으로 최적화해 희소



성에 따른 불필요한 전력 소모를 차단한다. 아울러 분산된 LDO의 부하를 실시간으로 감지하고 전류를 동적으로 재분배해 특정 LDO로의 과부하 집중을 방지, 시스템 전체의 전력 전달 효율을 크게 높였다. 제안된 시스템은 기존 방식 대비 부하가 큰 환경에서 전압 강하를 44.3% 감소시켰으며, 다양한 희소성 조건에서 12.3~22.5%의 성능 향상 또는 21.1~33.3%의 에너지 절감을 달성했다.



[그림 1] 제안된 AI 프로세서 전력 관리 시스템

저자정보



조혁준 석사과정 대학원생

- 소속 : Dankook University 파운드리공학과
- 연구분야 : Biomedical Circuits
- 이메일 : sdi5236@dankook.ac.kr
- 홈페이지 : <https://sites.google.com/dankook.ac.kr/acs-lab>

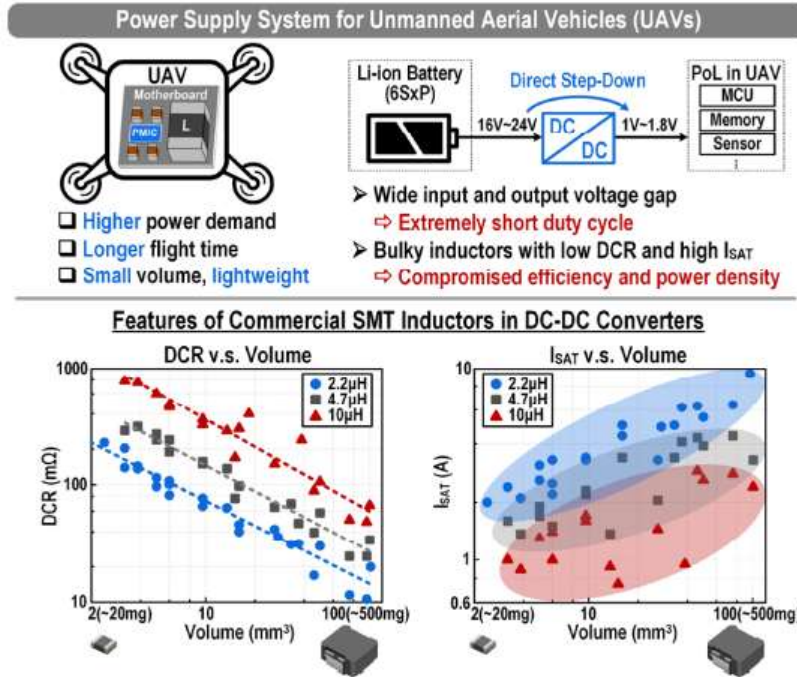
2025 IEEE VLSI Review

고려대학교 전기전자공학과 박사과정 이윤호

Session 26 Switching Regulators

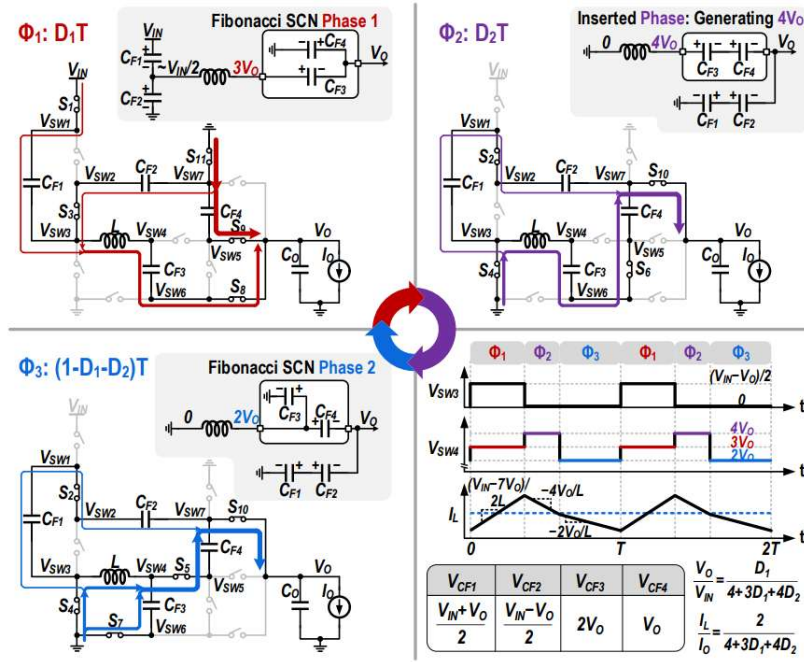
이번 2025 IEEE VLSI의 Session 26은 Switching Regulator를 주제로 총 4편의 논문이 발표되었으며, 가정용 IoT 기기를 위한 AC-DC 컨버터부터 UAV 전원용 하이브리드 컨버터까지 다양한 응용 분야를 다루는 새로운 전력 변환 토폴로지와 효율 향상 기법들이 소개되었다. 이 가운데 본 글에서는 Fibonacci 기반 Switched-Capacitor Network를 활용해 인덕터 전류를 효과적으로 줄이고 전력 밀도와 효율을 동시에 높인 하이브리드 컨버터, 그리고 Unified Imbalance Calibration Technique(UICT)를 적용해 플라이잉 커패시터 전압과 인덕터 전류를 동시 밸런싱한 2-페이즈 3-레벨 부스트 컨버터에 초점을 맞추어 살펴보고자 한다.

#26-2 본 논문은 6-셀 리튬 이온 배터리를 사용하는 UAV(Unmanned Aerial Vehicle) 시스템을 위해, 높은 전압 변환비에서도 고효율을 달성할 수 있는 1-stage 하이브리드 벅 컨버터를 소개하였다. 아래의 그림 1과 같이 모든 부하 전류가 인덕터를 통해 전달되는 기존의 벅 컨버터에서는, 높은 전류 구동 능력과 높은 효율을 확보하기 위해 낮은 DCR과 높은 포화 전류를 만족하는 큰 부피의 인덕터가 필요하다. 그러나 이러한 인덕터는 전력 밀도를 크게 낮추고, 인덕터의 DCR로 인한 전도성 손실을 증가시켜 전체 시스템 효율을 저하시키는 주요 원인이 된다. 이를 해결하기 위해 본 논문은 Fibonacci 기반 Switched-Capacitor Network와 3-Phase 동작을 결합하여 인덕터 전류를 Σ -Fibonacci 영역으로 최소화함과 동시에 인덕터 전압 스윙을 줄임으로써, 인덕터의 DCR 및 ACR 손실을 동시에 저감하는 고효율 전력 변환 토폴로지를 제안하였다.



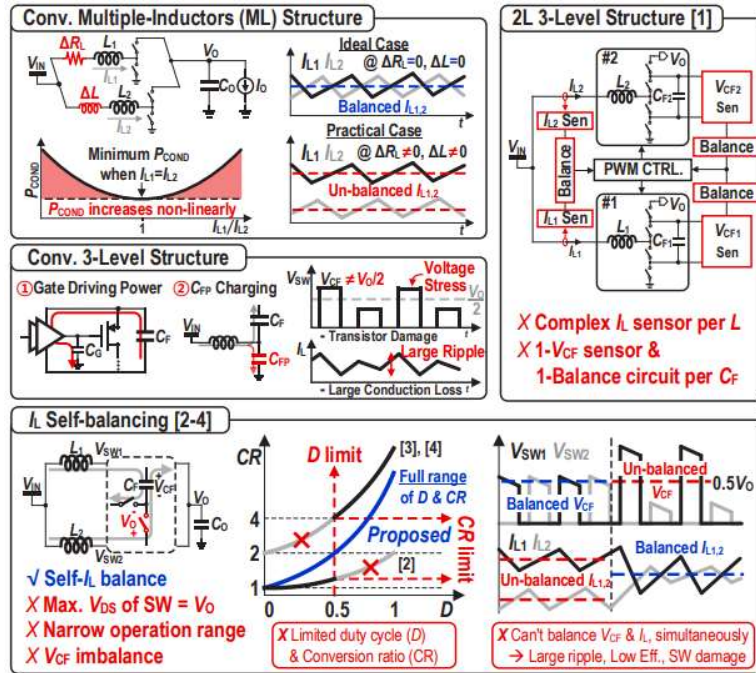
[그림 1] Power supply system for UAVs and features of commercial SMT inductors

아래 그림 2는 제안된 Dual-Path 하이브리드 벅 컨버터의 회로와 동작 원리를 보여준다. 제안된 컨버터는 세 개의 위상으로 동작하며, 각 위상마다 플라이징 커패시터와 인덕터를 통해 출력으로 전류를 공급한다. $\phi 1$ 구간에서는 인덕터가 $V_{IN}/2$ 전압으로 에너지를 충전하는 동시에, CF1 및 CF2가 직렬로 출력과 연결되어 인덕터와 함께 세 개의 경로로 출력에 전류를 공급한다. $\phi 2$ 구간에서는 인덕터가 방전하면서 CF3 및 CF4가 동시에 충전되고, 인덕터 전류 경로와 CF1과 CF2의 전류 경로를 통해 출력에 전류가 전달된다. $\phi 3$ 구간에서는 인덕터, CF3, CF2 세 개의 전류 경로로 출력 전류를 공급한다. 이와 같은 3-Phase 동작과 플라이징 커패시터 네트워크 덕분에 출력 전류가 인덕터 하나에 집중되지 않고 세 경로 또는 두 경로로 분산된다. 결과적으로 인덕터의 평균 전류가 대폭 줄어들어 인덕터에 의한 DCR 손실이 감소한다. 또한, CF1과 CF2는 항상 직렬로 연결되어 인덕터 양단에 인가되는 전압을 입력 전압의 절반 수준으로 낮춰 주기 때문에, 인덕터 전류 스윙이 크게 줄어들어 인덕터의 AC 손실을 감소시켜준다. 이로 인해, 더 작은 인덕터로도 동일한 부하 전류를 고효율로 감당할 수 있어 전체 전력 밀도와 효율이 크게 개선된다. 이러한 기술을 통해 제안된 컨버터는 1.187 W/mm³의 전력 밀도와 93.9%의 높은 피크 효율을 달성했으며, 높은 전압 변환 비에서도 우수한 전력 변환 효율을 보여준다.



[그림 2] Operating principle of the proposed hybrid buck converter

#26-3 본 논문은 LED 드라이버나 배터리 충전기 등 높은 전압이 필요한 모바일 시스템을 위해, 넓은 전압 변환비에서도 안정적으로 동작할 수 있는 2L-3LV 부스트 컨버터를 제안하였다. 아래 그림 3과 같이 기존 다중 인덕터 3-레벨 컨버터는 두 인덕터의 기생 저항 및 인덕턴스 등의 불일치로 인한 인덕터 전류 불균형(IL imbalance) 문제와, 플라이잉 커패시터의 전압 불균형(VCF imbalance) 문제로 인해 출력 전압 리플이 커지고 효율이 떨어지며 스위치의 손상 위험까지 초래한다. 특히 기존의 IL self-balancing 기법은 인덕터 전류를 맞추는 대신 VCF 불균형이 발생하여 근본적 해결이 어렵고, 동작 가능한 듀티사이클(D) 및 전압 변환비(VCR)가 제한되는 문제가 있었다. 이러한 문제를 해결하기 위해 본 논문은 플라이잉 커패시터를 공유하는 2-L 3-LV 부스트 컨버터 구조와 함께, Unified Imbalance Calibration Technique (UICT)를 제안하였다. UICT는 단일 보정 회로로 플라이잉 커패시터 전압과 인덕터 전류를 동시에 균형시키며, 동작 범위를 듀티사이클 및 전압 변환비의 제약 없이 확장할 수 있다.

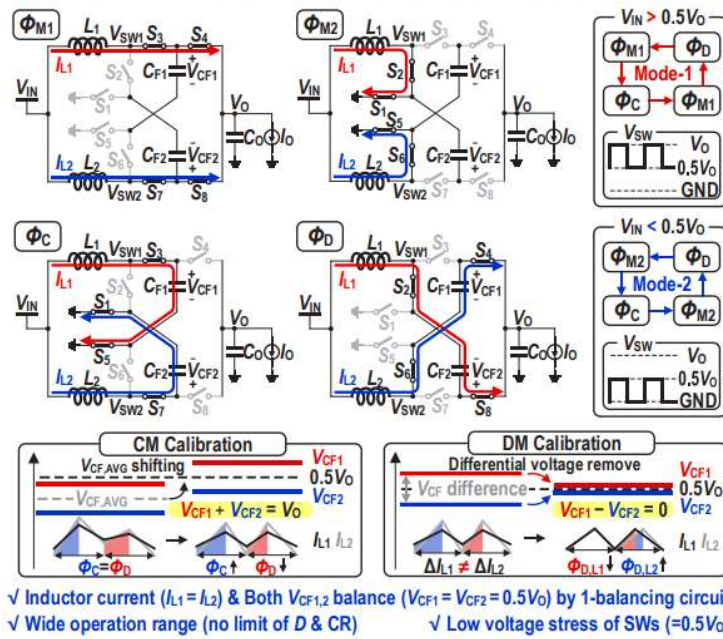


[그림 3] 인덕터 전류 및 플라이잉 커패시터 전압 variation과 기존 방식의 한계점

아래 그림 4는 본 논문에서 제안하는 2-L 3-LV 부스트 컨버터와 UICT의 동작 개념을 보여준다. 제안된 회로는 두 개의 인덕터(L_1 , L_2)와 두 개의 플라이잉 커패시터(CF_1 , CF_2)가 교차로 연결된 구조로, 한 주기 동안 각 인덕터가 번갈아 가며 CF_1 과 CF_2 를 충전 및 방전한다. 이때 L_1 과 L_2 의 전류가 불균형해지면 CF_1 과 CF_2 의 전압에도 차이가 발생하는데, UICT는 이러한 전압 차이를 감지해 추가적인 보정 전류를 생성한다. UICT는 크게 두 가지 보정 동작으로 이루어진다. 첫째, 공통 모드(CM) 보정은 두 커패시터 전압의 평균값이 출력 전압의 절반($0.5V_o$)이 되도록 스위칭 기간 ϕ_C 와 ϕ_D 를 조정하여 플라이잉 커패시터 전압의 기준점을 맞춘다. 둘째, 차동 모드(DM) 보정은 CF_1 과 CF_2 의 전압 차이를 기반으로 두 인덕터의 스위칭 듀티를 서로 다르게 조절해 전류의 평균을 매칭시킨다. 이를 통해 인덕터 전류의 차이가 사라지고, CF_1 과 CF_2 의 전압도 다시 동일해져 두 경로 모두에서 동일한 전류가 흐르도록 만든다. 결과적으로 제안된 회로는 V_{CF} 와 i_L 을 동시에 균형시키면서도 모든 스위치의 전압 스트레스를 $V_o/2$ 로 절감시켜, 듀티사이클이나 변환비의 제약 없이 넓은 동작 범위에서 5V 저전압 소자만으로 안정적인 동작을 할 수 있다.

이러한 기술을 통해 제안된 컨버터는 플라이잉 커패시터 전압 오차를 0.92% 미만, 인덕터 전류 밸런싱 오차를 0.22% 미만으로 감소시켜 매우 정밀한 밸런싱을 달성하였다. 또한 듀티사이클이나 변환비 제한 없이 전 영역에서 안정적으로 동작하며, 94.1%의 높은 피크 효율을 보여준다.

Proposed C_F -shared 2-Inductor 3-Level Boost Converter



[그림 4] 본 논문에서 제안한 2-L 3-LV 부스트 컨버터 및 UICT의 동작 개념

저자정보



이윤호 박사과정 대학원생

- 소속 : 고려대학교
- 연구분야 : Power management ICs
- 이메일 : uknow@korea.ac.kr
- 홈페이지 : <https://sites.google.com/site/kubasiclab/home>

2025 IEEE VLSI Review

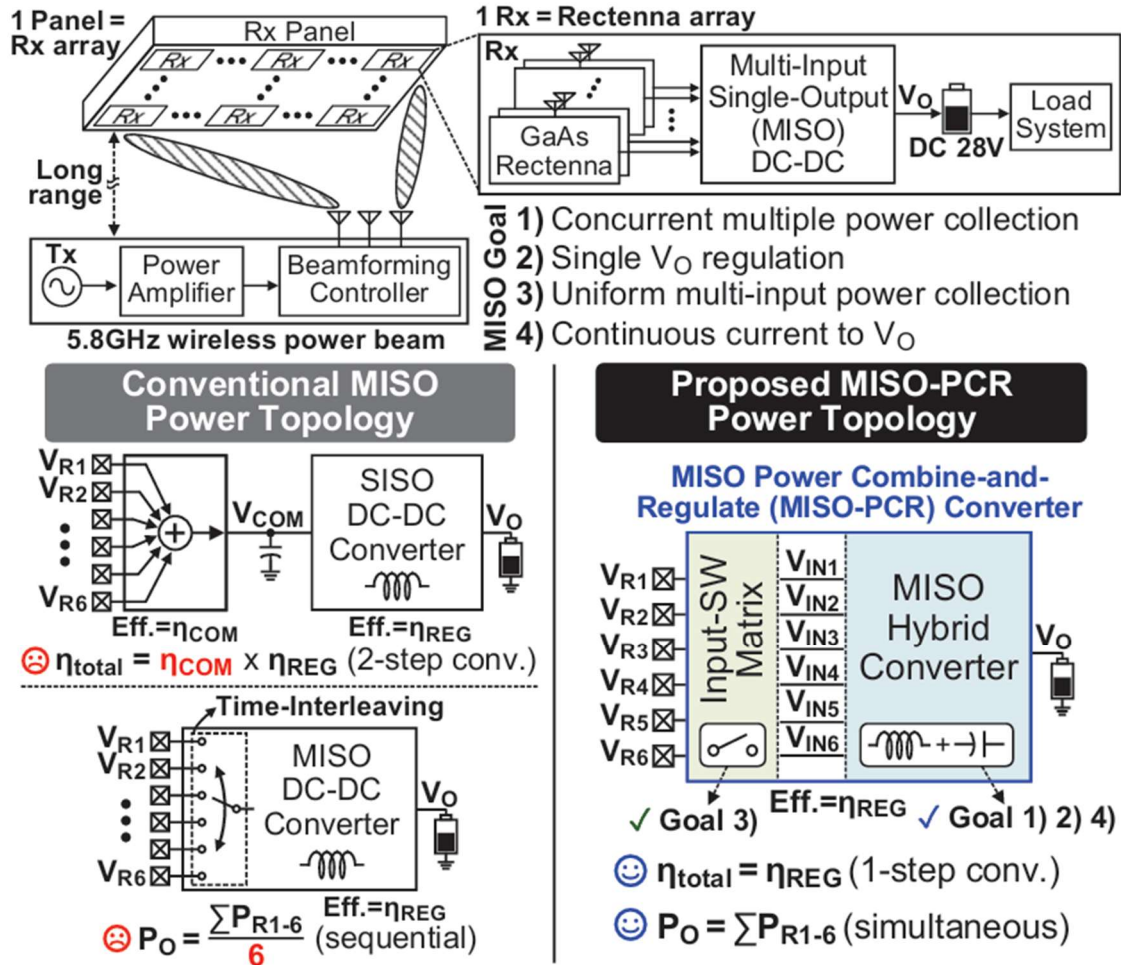
KAIST 전기및전자공학부 석사과정 박민하

Session 33 Wireless Power and Gate Drivers

세션 33은 'Wireless Power and Gate Drivers'를 주제로, 무선 전력 전송의 핵심 과제인 효율 및 전송 거리 개선과 이를 위한 핵심 구동 부품 기술을 다룬다. 이 세션에서는 50미터에 이르는 장거리에서도 전력을 보낼 수 있는 다중 수신 안테나(Multi-Rectenna) 기술이 소개되어 무선 전력 전송의 적용 범위를 크게 확장했다. 또한, 전력 전송과 동시에 데이터를 양방향으로 주고받을 수 있는 전력-데이터 통합 송수신 IC 논문도 발표되어, 전력 전달과 통신을 하나의 시스템으로 통합하는 기술의 중요성을 보여주었다. 또한 시스템의 효율을 극대화하는 부품 연구도 활발히 진행되었다. 특히, GaN 반도체를 구동하는 게이트 드라이버 기술이 주목받았다. 이 기술은 스위치 구동 시 발생하는 에너지를 재활용하고, 음(-)의 전압을 생성하여 시스템의 전력 효율을 극적으로 향상시키는 데 기여한다. 결론적으로 무선 전력 기술이 단순히 충전의 편의성을 넘어, 전송 거리의 한계를 극복하고 다른 기능과 융합하며 시스템의 전반적인 효율을 극대화하는 방향으로 발전하고 있음을 알 수 있다.

#33-2 이 논문은 한국과학기술원(KAIST)과 한국전기연구원(KERI)의 공동 연구팀이 발표한 것으로, 5.8GHz RF 무선 전력 전송(WPT) 수신기(Rx)를 위한 다중 입력-단일 출력 전력 결합 및 조절(MISO-PCR) 부스트 컨버터 칩을 개발하였다. 이 칩은 30개의 GaAs 정류 안테나(rectennas)로부터 수신된 여러 전력을 동시에 수집, 결합하여 단일의 28V로 안정화된 출력으로 변환하는 기능을 수행한다.

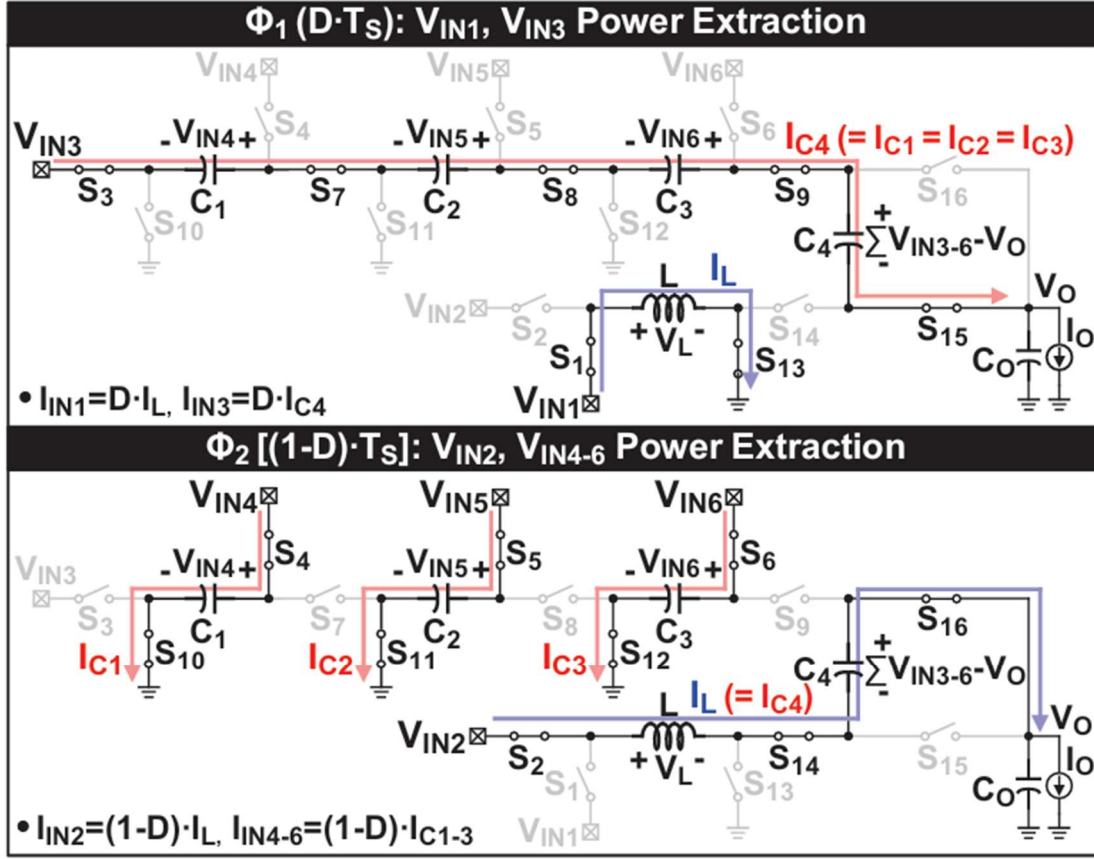
장거리 무선 전력 전송은 유망한 기술이지만, 거리가 멀어질수록 수신되는 전력이 급격히 약해지는 문제가 있다. 이를 해결하기 위해 여러 개의 수신 안테나를 배열하고 빔포밍 송신기(Tx) 기술을 이용해 전송 거리를 늘리는 방안이 연구되고 있다. 예를 들어, 효율 70%인 정류 안테나 한 개가 20dBm의 전력을 수신할 때, 30개로 구성된 배열은 약 2W의 전력을 전달할 수 있다. 그러나 이 전력을 모두 사용하기 위해서는 모든 안테나의 출력을 동시에 추출하여 단일 버스로 통합해야 한다. 기존의 전력 결합기는 전압을 안정화하는 기능이 없어 별도의 DC-DC 컨버터가 필요했고, 이는 효율 감소로 이어졌다.



[그림 1] RF-WPT 정류 안테나 배열로부터 다중 소스 전력을 수집하기 위한 제안된 MISO-PCR 전력 관리의 개념도

본 논문은 이러한 한계를 극복하기 위해 MISO-PCR 부스트 컨버터를 제안한다. 이 칩은 여러 정류 안테나의 출력을 단일 단계에서 동시에 결합하고 안정화된 전압을 제공한다. 또한, 여러 입력 소스에서 균일하게 전력을 추출할 수 있도록 알고리즘적 입력 스위치 매트릭스와 결합되어 있다.

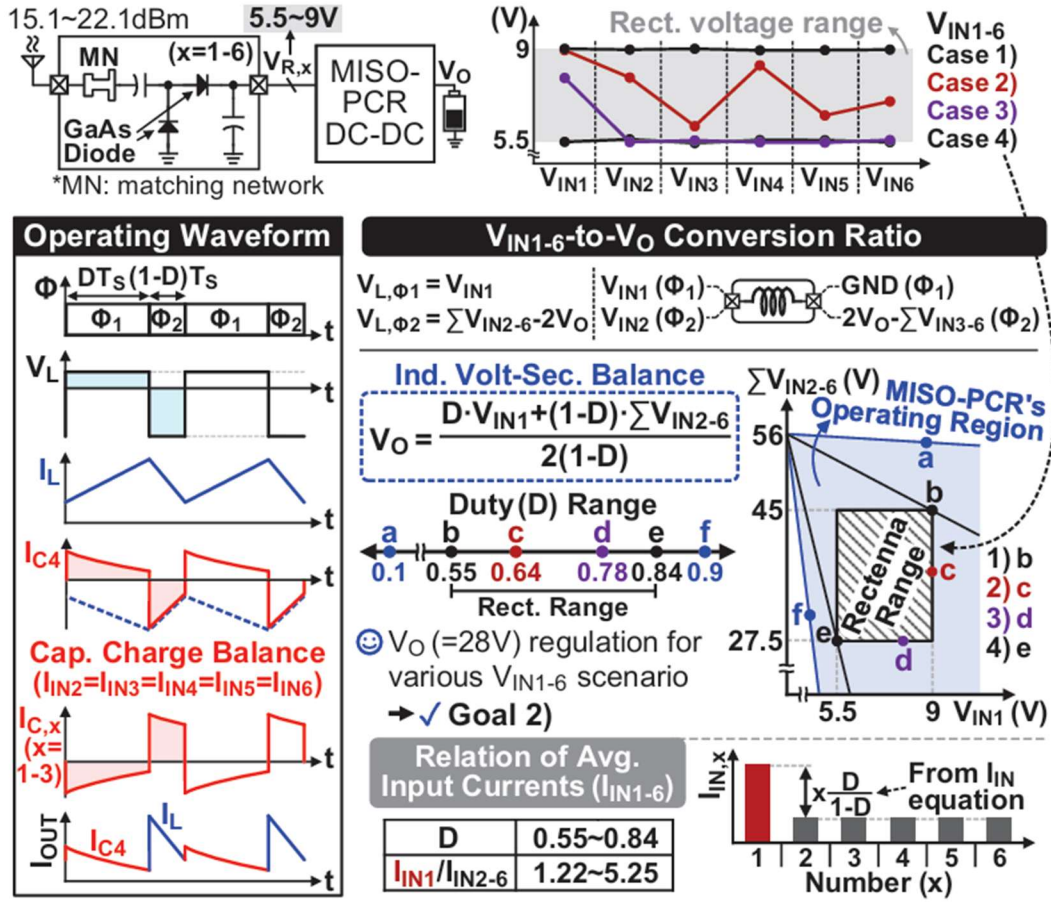
논문에 제시된 [그림 1]은 이 시스템의 작동 방식을 시각적으로 보여준다. [그림 1]의 상단은 빔포밍 송신기가 여러 개의 수신 안테나 배열에 전력을 전송하는 전체 시스템 구성을 나타내며, 이는 장거리 무선 전력 전송을 가능하게 하는 핵심 원리이다. [그림 1]의 왼쪽 하단은 기존 기술의 한계를 보여준다. 기존 방식은 여러 개의 입력 소스를 각각의 DC-DC 컨버터를 거쳐 전압을 조절한 뒤 합치거나, 순차적으로 전력을 수확하는 방식이어서 비효율적이었다. 반면, 오른쪽 하단은 논문에서 제안하는 MISO-PCR 칩을 보여준다. 이 칩은 여러 입력(Multi-Input)을 받아 단일 출력(Single-Output)으로 전력 결합(Power Combine)하고 안정화(Regulate)하는 과정을 한 번에 수행한다.



- ☺ 6-input hybrid (C+L) structure
 - ☺ V_{IN1-6} power collection in $1T_s$
 - ☺ Continuous power delivery ($I_{C4} + I_L$)
- } ✓ Goal 1) 4)

[그림 2] MISO-PCR 부스트 컨버터의 토폴로지 및 작동

논문에서 제안하는 MISO-PCR 토폴로지는 6개의 DC 입력(V_{IN1-6}), 4개의 플라이-커패시터 (C_{1-4}), 1개의 인덕터(L), 그리고 1개의 단일 출력(V_O)으로 구성된다. 이 컨버터는 한 스위칭 주기(T_s) 동안 두 가지 위상(Φ_1, Φ_2)으로 동작한다. Φ_1 위상($D \cdot T_s$) 동안 V_{IN1} 은 L에 에너지를 공급하고, C_{1-4} 는 V_{IN3} 와 V_O 사이에 직렬로 연결된다. 이전 Φ_2 위상에서 C_{1-3} 이 각각 V_{IN4-6} 에 의해 미리 충전되었기 때문에, 이제 C_4 는 $V_{IN3} + \sum V_{IN4-6} - V_O$ 까지 충전된다. 이로써 Φ_1 동안 V_{IN1} 과 V_{IN} 에서 전력을 끌어온다. 다음 Φ_2 위상($(1-D) \cdot T_s$)에서는 V_{IN4-6} 가 C_{1-3} 을 재충전하고, V_{IN2} , L, C_4 , V_O 가 직렬 경로를 형성한다. 이 과정을 통해 매 주기마다 모든 입력에서 전력을 동시에 추출하여 최대의 전력 수집을 가능하게 한다.



[그림 3] ISO-PCR의 6개 입력에서 V_O 로의 변환 및 입력 전류.

MISO-PCR 컨버터는 6개의 입력 전압(V_{IN1-6})을 하나의 출력(V_O)으로 변환하며, 그 변환 비율은 $V_O = [D \cdot V_{IN} + (1-D) \cdot \sum V_{IN2-6}] / [2 \cdot (1-D)]$ 로 계산된다. 이 수식은 듀티 비(D)를 제어함으로써 입력 전압이 크게 변하더라도 V_O 를 28V로 안정화시킬 수 있음을 보여준다. 예를 들어, 정류 안테나의 전압이 5.5V에서 9V 사이일 때, 이 컨버터는 0.55에서 0.84 사이의 듀티 비 조절만으로 안정적인 28V 출력을 유지할 수 있다. 그러나 이 회로 토폴로지 자체는 V_{IN1} 에서 추출되는 전류(I_{IN1})가 다른 입력(I_{IN1-6} 과 $D/(1-D)$ 배만큼 차이가 나는 전류 불균형 문제를 가지고 있다.

논문은 이러한 전류 불균형 문제를 해결하기 위해 알고리즘적 입력-스위치 매트릭스를 도입한다. 이 매트릭스는 6개의 정류 안테나 출력(V_{R1-6})과 MISO-PCR의 입력(V_{IN1-6}) 사이의 연결을 동적으로 재구성한다. 이 과정을 통해 MISO-PCR 컨버터 내부의 전류 불균형에도 불구하고, 모든 정류 안테나에서 추출되는 평균 전류가 균등하게 유지되도록 보장한다. 이 매트릭스가 없으면 일부 정류 안테나의 전력이 완전히 수확되지 않아 전체 효율이 감소하게 된다. 논문은 또한 정류 안테나 전압이 불균일할 때 발생할 수 있는 '하

드-차징(hard-charging)' 손실을 최소화하는 알고리즘을 제안하여, 최악의 경우 손실 횟수를 16회에서 6회로 줄일 수 있음을 밝혔다.

제안된 MISO-PCR 칩은 5V CMOS와 고전압 LDMOS 소자를 사용하여 제작되었다. 특히, 스위치(S15, S16)는 출력(V_O)으로부터의 역류를 막기 위해 백투백(back-to-back) 형태로 구성되었다. 이 칩은 외부 제어 없이도 스스로 동작할 수 있으며, 전원 공급이 없는 상태에서 자동으로 시작하는 콜드-스타트업(cold-startup) 기능과 자율적인 작동을 지원하여 시스템의 독립성을 높였다.

180nm BCD 공정으로 제작된 칩을 20.4 x 19cm² 크기의 RF-WPT 수신기 패널에 통합하여 그 성능을 측정하였고, 5.8GHz 무선 전력 전송 시스템은 4m(실내)와 50m(실외) 거리에서 성공적으로 작동했다. 50m 거리에서 최대 3.1W의 출력 전력을 달성했으며, MISO-PCR 칩 자체는 최고 93.2%의 높은 효율을 기록했다. 전체 수신기 시스템의 효율은 입력 전력이 22.1dBm일 때 최고 63.8%에 도달했다. 결론적으로, 이 연구는 제안된 MISO-PCR 시스템이 기존 연구들에 비해 더 나은 성능을 보였음을 증명했다.

저자정보



박민하 석사과정 대학원생

- 소속 : KAIST
- 연구분야 : 디지털 회로 설계
- 이메일 : mhpark@ics.kaist.ac.kr
- 홈페이지 : <https://idec.or.k>