

6G 기지국 에너지 효율 향상을 위한 RF 전력증폭기 전원 운용에 관한 연구

주영환, 김기진
한국전자기술연구원

yhchoo86@keti.re.kr, sergeant@keti.re.kr

A Study on Power Management of RF Power Amplifiers for Enhancing Energy Efficiency in 6G Base Stations

Younghwan Choo, Ki-Jin Kim
Korea Electronics Technology Institute

요 약

본 논문은 6G 에너지 효율 향상을 위한 기지국용 RF 전력증폭기 전원 운용에 관한 연구로, 기지국의 전력 소비를 낮추기 위해 대기 모드시에는 RF 전력증폭기의 전원 전압을 최대한 낮게 가져가고, 활성 모드시에는 전원 전압을 빠르게 바이어스 전압까지 올리는 기술인 심볼 추적 기술에 대한 연구이다.

I. 서 론

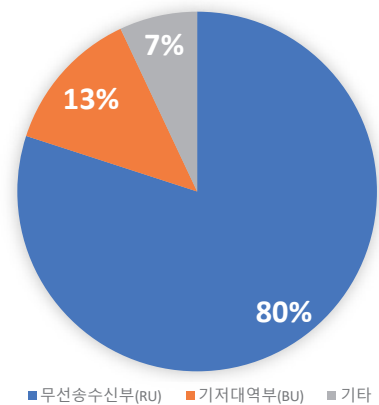
6G 이동통신에서는 초고속, 초저지연, 초연결 서비스를 실현하기 위해 기지국 밀도와 네트워크 처리량이 대폭 증가할 것으로 예상된다. 이에 따라 통신 인프라의 에너지 소비가 급격히 증가할 것으로 보이며, 특히 기지국의 에너지 효율성 향상이 핵심 과제로 대두되고 있다.

본 연구는 트래픽 상황에 따라 기지국의 전력 소비를 유동적으로 제어하는 전원 운용 기술, 특히 심볼 파워 추적(Symbol Power Tracking, SPT) 기반의 전원 제어 기법을 활용하여 대기전력을 최소화하는 방안을 제안한다. 본 연구는 에너지 효율적인 6G 기지국 설계를 위한 기반 기술을 제공하는 데 목적이 있다.

II. 본론

5G 기지국에서는 네트워크 제어 신호 및 주기적인 시스템 브로드캐스팅으로 인해, 트래픽 부하가 낮거나 송수신 요구가 없을 때에도 RF 전력증폭기가 항상 최대 전력 상태에서 동작하는 문제가 있었다. 그림 1 에서 5G 기지국에서의 전력 소비 분포도를 보면 무선송신부에서 사용하는 전력이 80%정도 되고, 무선 송신부의 전력 사용량 중 활성(Active) 모드에서 60%, 대기(Idler) 모드에서 40%의 전력이 사용되고 있다. 활성 모드에서 사용하는 전력 소비량의 70% 정도가 대기 모드에서 낭비되고 있고 이는 결과적으로 불필요한 대기전력 소비를 유발하고, 전체 시스템의 에너지 효율을 저하시켰다.

5G 기지국 부품별 전력 소비 분포



5G 기지국 대기/활성 모드 전력 소비 분포

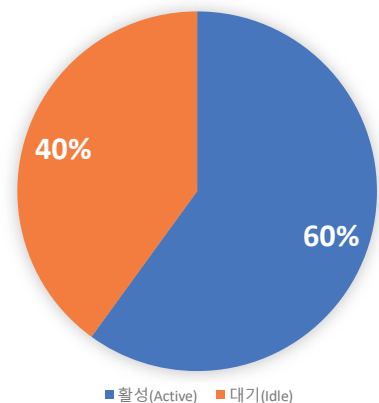


그림 1. 5G 기지국 부품별, 대기/활성 모드별 전력 소비 분포도

6G에서는 이러한 문제를 해결하기 위해, 기지국의 동작 상태를 트래픽 상황이나 실제 송수신 요구에 따라 유연하게 제어하는 전원 운용 방식이 요구된다. 특히, 비활성 상태에서는 전력증폭기의 전원 전압을 가능한 한 낮게 유지하고, 활성 상태 진입 시에는 빠르게 바이어스 전압까지 전압을 상승시키는 방식이 효과적이다.

이를 실현하기 위한 기술로 주목받는 것이 SPT 방식의 전원 운용 기법이다. 이 방식은 대기전력 상태에서 전력증폭기의 전원을 최소한으로 낮춘 후, 실제 활성 구간에서 RF 전력증폭기의 전원을 빠르게 바이어스 전압까지 변화시키는 기술로, 전력증폭기에서 발생하는 불필요한 에너지 낭비를 줄이고, 응답 속도와 통신 품질도 동시에 확보할 수 있다.

최근 다수의 연구에서 SPT를 구현하기 위한 다양한 전원 변조기(Supply Modulator, SM)가 제안되고 있다. [1]에서는 통신단말에서 심볼 단위 추적 기술을 최초로 제안하여 통신 단말용 전력증폭기의 전원을 90ns/V의 빠른 전압 전환 특성을 가지고 추적이 가능함을 보였고, [2]에서는 74W급 GaN 기반의 멀티레벨 전원 공급기를 통해 Massive-MIMO 기지국용 고효율 전원 구성 및 기지국 전력증폭기에서의 SPT 적용 가능성을 제시하였다. 또한, [3]에서는 통신단말에서 6G 대역폭과 유사한 5G FR2 영역에서 대역폭 400MHz SPT를 지원하는 전원 모듈레이터를 제안함으로써 전력증폭기의 에너지 효율을 극대화하였다.

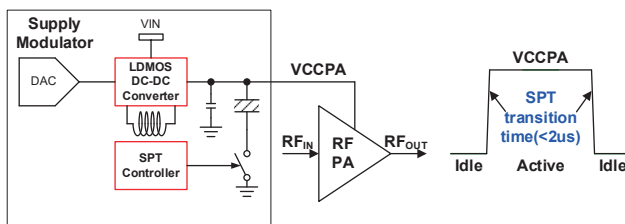


그림 2. 제안하는 6G 기지국 에너지 효율 향상을 위한 심볼 파워 추적 전원변조기 기술

본 논문에서 제안하는 6G 기지국 전력증폭기 SPT를 지원하기 위한 전원 변조기는 그림 2와 같이 수십 볼트(V) 수준의 고전압을 빠르게 변조해야 하므로, 고전압 구동이 가능한 LDMOS(Laterally Diffused MOSFET)를 사용한 직류-직류 변환기(DC-DC Converter) 사용이 필수적이고, 전원 변조기의 출력단에는 수십 마이크로패럿(μF) 수준의 대용량 출력 커패시터가 존재하는데, 이 커패시터의 전압을 빠르게 충방전시키기 위한 회로 설계(SPT Controller)가 필요하다. 이를 위해, 고속 스위칭이 가능한 직류-직류 변환기 구조와 함께, 출력 커패시터의 전압 변동을 최소화할 수 있는 제어 기법이 요구된다 [4]. 이러한 기술들은 6G 기지국의 에너지 효율을 극대화하고, 빠른 응답 속도를 확보하는 데 핵심적인 역할을 할 것으로 기대된다.

이들 연구 결과는 6G 기지국에서도 적용 가능한 전원 운용 기법으로 확장될 수 있으며, 고속 전력 전환 능력과 고효율 구성이 가능한 SPT 기반 회로는 6G 기지국의 심볼 기반 전원 제어 기술의 실현 가능성을 높이는 중요한 기반 기술이 될 것으로 보인다.

III. 결론

6G 시대의 기지국 설계에서는 초고속 통신뿐만 아니라, 에너지 효율을 고려한 전력 관리 기술의 중요성이 더욱

부각되고 있다. 특히, 대기 상태에서의 불필요한 전력 소모를 최소화하고, 필요한 시점에 빠르게 RF 전력증폭기의 전원을 공급할 수 있는 고속 전력 제어 기술이 핵심이 된다.

본 연구에서는 심볼 파워 추적(SPT) 기반의 전원 운용 기법을 중심으로, 고속 전력 제어가 가능한 전원 모듈레이터 회로 기술과 이를 구성하기 위한 핵심 소자(LDMOS)의 활용 가능성에 대해 살펴보았다. 특히, 기지국 전력 변조기의 고전압 구동 특성과 대용량 출력 커패시터의 빠른 충방전 문제를 해결하기 위한 회로적 고려사항을 제시함으로써, 향후 6G 기지국용 에너지 효율화 회로 설계에 실질적인 방향성을 제공하였다.

향후 연구에서는 본 기술을 실제 기지국 환경에 적용하여 SPT 기반의 전원 운용 기법이 통신 품질과 에너지 효율성에 미치는 영향을 실증적으로 분석하고, 전체 시스템 차원에서의 통합 전력 제어 아키텍처로 확장해 나가는 연구가 필요할 것이다.

ACKNOWLEDGMENT

This work was supported by Institute for Information & Communications Technology Planning & Evaluation (IITP) grant funded by the Korea government(MSIP). [RS-2024-00395702]

참 고 문 헌

- [1] J. -S. Paek et al., "15.2 A 90ns/V Fast-Transition Symbol-Power-Tracking Buck Converter for 5G mm-Wave Phased-Array Transceiver," 2019 IEEE International Solid-State Circuits Conference - (ISSCC), San Francisco, CA, USA, 2019, pp. 240-242.
- [2] H. M. Pham et al., "A 74W/48V Monolithic-GaN Integrated Adjustable Multilevel Supply Modulator for 5G Base-Station Massive-MIMO Arrays," 2025 IEEE International Solid-State Circuits Conference (ISSCC), San Francisco, CA, USA, 2025, pp. 1-3.
- [3] J. Baek and A. Niknejad, "9.2 A 400MHz Symbol-Power-Tracking (SPT) Supply Modulator with SPT-Adaptive-Biasing Network Supporting 5G FR2 CMOS PA," 2025 IEEE International Solid-State Circuits Conference (ISSCC), San Francisco, CA, USA, 2025, pp. 1-3.
- [4] I. -H. Kim et al., "31.3 A 950ns 0.5-to-5.5V 5G NR RF PA Supply Modulator with Floating Capacitor Control for Symbol Power Tracking," 2024 IEEE International Solid-State Circuits Conference (ISSCC), San Francisco, CA, USA, 2024, pp. 500-502.