

탄소중립을 위한 기지국 에너지 조절 강화학습 알고리즘 분석

이민지, 김중헌

고려대학교

lminji@korea.ac.kr, joongheon@korea.ac.kr

Analysis of Reinforcement Learning Algorithms for Base Station Energy Control Toward Carbon Neutrality

Lee Min Ji, Kim Joong Heon

Korea Univ.

요 약

기지국은 이동통신망에서 전력을 많이 쓰는 장비로 알려져 있다. 모바일 네트워크 전체 에너지 사용에서 무선 접속망이 73%를 차지하며, 에너지 절감의 주요 관심 영역이 radio access network (RAN)임을 강조한다. 전력을 줄이면 대체로 탄소 배출도 줄어드는 방향으로 연결된다. 다만 탄소를 정확히 논하려면 전기를 얼마나 썼는지와 그 전기가 어떤 배출계수를 가지는지를 함께 봐야 한다. greenhouse gas (GHG) Protocol의 Scope 2 Guidance는 전력 사용으로 생기는 간접 배출량을 계산할 때, 전력 사용량을 배출계수와 곱하는 방식을 권고한다. 기지국 에너지 조절은 트래픽이 시간에 따라 바뀌기 때문에, 고정 규칙만으로는 한계가 있다. 트래픽 변화에 맞추어 시간, 주파수, 공간, 전력 영역의 무선 파라미터를 적응적으로 조정하는 방법이 RAN 에너지 효율을 높이는 핵심 기법이라고 설명한다. 본 논문은 탄소중립 관점에서 기지국 에너지 조절에 적용되는 강화학습 연구 동향을 정리한다. 특히 무엇을 조절하는지와 무엇을 줄이려하는지를 설명하고, 표준 문서가 제시하는 정의와 구조를 함께 연결한다.

I. 서 론

탄소중립을 위해 통신망에서도 전력 사용을 줄이는 노력이 필요하다. 통신망은 코어망, 데이터센터, 무선 접속망 등 여러 부분으로 구성된다. 이중 radio access network (RAN)이 에너지 사용에서 큰 비중을 차지한다. 따라서 기지국을 포함하는 RAN의 전력 제어는 탄소중립 논의에서 중요한 출발점이 된다.

탄소 배출을 다룰 때는 계산의 기준을 분명히 해야 한다. greenhouse gas (GHG) Protocol의 Scope 2 Guidance는 조직이 구매, 획득하여 소비한 전기의 발전 과정에서 발생하는 간접 배출을 scope 2로 보고, 이를 계산하기 위해 전력 사용량을 배출계수와 곱하는 방식을 권고한다. 또한 공급 정보가 없을 때는 지역 또는 국가의 전력망 배출계수 같은 통계를 사용할 수 있다. 따라서 본 논문에서는 전력 사용을 줄이는 것을 기본 목표로 두되, 탄소중립 관점에서는 전력 사용량과 배출계수의 곱이 핵심임을 전제로 한다[1]. 그림 1은 탄소 배출원과 저감 수단을 함께 나타낸 개념도이다.

에너지 절감 연구에서 자주 혼동되는 부분은 전력과 에너지의 차이이다. European telecommunications standards institute technical specification (ETSI TS) 104 226은 에너지 소비를 전력 소비를 시간에 적분한 값으로 정의한다. 즉 같은 전력이라도 오래 쓰면 에너지가 커지고, 같은 시간이라도 전력을 높이면 에너지가 커진다. 이 정의는 기지국 절전 방법을 이해하는 데 유용하다. 기지국은 전력을 낮추는 방식과 필요 없는 시간에는 기능을 꺼서 시간을 줄이는 방식을 함께 고려하기 때문이다. 표준화 관점에서도 에너지 효율은 꾸준히 논의되어 왔다. 3rd generation partnership project technical report (3GPP TR) 32.972(ETSI TR 132 972)는 5G 네트워크의 에너지 효율 측면을 다루면서, 에너지 효율 key performance indicator (KPI) 정의, 측정 방법, 에너지 효율 향상 해법, 그리고 self-organizing network (SON)과 유사한 에너지 효율 제어 프레임



그림 1. 탄소 배출과 탄소 저감 개념도

워크까지 연구 범위에 포함한다고 밝힌다. 한편, open radio access network (O-RAN) 생태계에서는 artificial intelligence (AI)/machine learning (ML) 기반 최적화를 실제 운영 구조 안에 넣는 방식이 정리되어 있다. ETSI TS 104 226은 near-real-time RAN intelligent controller (Near-RT RIC)과 non-real-time RIC (Non-RT RIC)의 개념을 정의한다. Near-RT RIC은 E2 인터페이스를 통해 RAN 요소와 자원을 준실시간으로 제어·최적화하는 논리 기능으로 정의된다. Non-RT RIC은 service management and orchestration (SMO) 프레임워크 안에서 비실시간 제어 및 최적화와 AI/ML 모델 학습 및 업데이트, 그리고 Near-RT RIC 기능에 대한 정책 기반 가이드를 수행하는 논리 기능으로 정의된다. 이 구조는 강화학습을 어디에서 학습시키고, 어디에서 실행할지를 설명할 때 실용적인 틀이 된다[2].

II. 본론

강화학습은 상황을 보고 행동을 선택한 뒤, 결과에 따라 다음 행동을 더 잘 고르는 방식으로 이해할 수 있다. 기지국 에너지 조절 문제에 이를 적용하려면, 먼저 기지국이 보고 판단할 상황 정보가 필요하다. 이 정보는 보통 트래픽의 크기, 사용자 분포, 무선 품질, 인접 셀의 상태 같은 값으로 구성된다. 다음으로 기지국이 실제로 바꿀 수 있는 제어 항목이 필요하다. 마지막으로 그 결과를 숫자로 평가하는 보상이 필요하다. 이 보상은 절전 이득을 높이고 품질 저하를 줄이도록 설계된다.

탄소중립 관점의 보상은 에너지 절감만으로는 충분하지 않을 수 있다. GHG Protocol의 Scope 2 Guidance는 전기 사용에 따른 배출을 계산할 때 전력 사용량과 배출계수를 곱하는 방식을 권고한다. 또한 배출계수는 kWh 또는 MWh당 배출량으로 표현될 수 있음을 설명한다. 따라서 강화학습의 보상에서도 소비한 전력만 줄이는 목표와, 배출계수를 고려한 탄소까지 줄이는 목표를 구분해 둘 필요가 있다. 다만 실제 연구에서는 배출계수 데이터를 어떤 방식으로 넣는지, 그리고 어떤 범위를 scope 2로 보는지가 연구마다 달라질 수 있다.

기지국 에너지 조절 연구를 처음 접하는 입장에서는, 알고리즘 이름보다 무엇을 조절하는지를 먼저 보는 편이 이해가 쉽다. ETSI TS 104 226은 네트워크 에너지 소비가 고정 성분과 부하 의존 성분으로 구성된다고 설명한다. 고정 성분에는 제어 신호, 백홀 인프라, 부하와 무관한 베이스밴드 처리 전력 등이 포함된다고 서술한다. 또한 트래픽이 낮은 시간에도 고정 성분 때문에 불필요한 에너지 소비가 생길 수 있으며, 이를 줄이기 위한 방법으로 O-RAN radio unit (O-RU)를 일정 시간 동안 끄는 슬립 모드를 언급한다. 이 설명은 강화학습 연구의 목표가 부하가 낮을 때 얼마나 과감히 꺼도 되는가로 자연스럽게 연결된다는 점을 보여준다.

O-RAN의 대표적 절전 유스케이스는 슬립 모드의 지능적 선택과 구성 요소의 부분 비활성화이다. ETSI TS 104 226의 Advanced sleep mode 설명에 따르면, O-RU의 슬립 모드는 구성 요소를 단계적으로 비활성화하는 방식이며, O-RAN에서 네 가지 수준의 슬립 모드가 지정되어 있다고 서술한다. 또한 더 깊은 슬립 수준은 더 큰 에너지 절감이 가능하지만, 구성 요소 재활성화 시간이 길어져 사용자가 체감하는 지연이 커질 수 있다고 설명한다. 이 내용은 강화학습 보상을 설계할 때 에너지 절감과 사용자 지연을 함께 넣어야 함을 매우 직관적으로 시사한다. 즉 절전이 목표라도, 품질 저하가 커지면 정책이 실용적이지 않다.

또 다른 흐름은 안테나나 배열을 일부 끄는 방식이다. ETSI TS 104 226은 multiple-input multiple-output (MIMO) 환경에서 빔포밍을 위해 많은 안테나 배열이 쓰이며, 부하가 낮을 때는 O-RU의 일부 transmit/receive 배열을 꺼서 전력 소비를 줄일 수 있다고 설명한다. 예로 64개 중 32개의 배열을 끄는 형태를 언급한다. 또한 이 스위치 On/Off 결정은 Non-RT RIC에 배치된 AI/ML 모델이 수행할 수 있으며, 미래 트래픽이나 사용자 이동성 등을 예측에 활용할 수 있다고 서술한다. 이 흐름은 강화학습이 미래를 추정하고 그에 맞춰 자원을 줄이는 정책을 학습하는 데 적합하다는 점을 보여준다. 다만 예측이 틀릴 수 있으므로, 품질 안정장치를 함께 고려하는 연구가 필요하다.

셀 또는 캐리어 단위의 스위치 On/Off도 중요한 주제이다. ETSI TS 104 226의 에너지 효율/절전 관련 흐름에서는 AI/ML 모델 추론을 통해 셀과 캐리어의 스위치 On/Off를 위한 제어 또는 정책을 만들고, 이를 기반으로 Near-RT RIC이 제어 메시지를 생성해 E2 인터페이스를 통해 전달하는 과정을 설명한다. 이 과정은 학습과 실행을 분리하는 구조로 이해할 수 있다. Non-RT RIC은 데이터와 모델을 다루는 쪽에 가깝고, Near-RT RIC은 네트워크에 실제로 적용하는 쪽에 가깝다. ETSI TS 104 226이 제시한 정의에서도 Non-RT RIC은 SMO 프레임워크 안에서 AI/ML 학습과 정

책 가이드를 수행하며, Near-RT RIC은 E2를 통해 RAN 자원에 대한 제어·최적화를 수행한다고 명확히 정리한다.

중요한 또 하나의 쟁점은 평가의 공정성이다. 에너지 효율을 말할 때는 무엇을 어떻게 잴 것인가가 분명해야 한다. ETSI TS 104 226은 에너지 소비를 전력의 시간 적분으로 정의하고, 에너지 효율은 유용한 출력과 에너지/전력 소비의 관계로 정의한다. 또한 3GPP TR 32.972는 5G 에너지 효율 연구 범위로 KPI 정의와 측정 방법을 포함한다고 밝힌다. 따라서 강화학습 기반 절전 연구를 비교할 때는, 단순히 전력이 줄었다는 결과만 제시하면 부족하다. 전력 또는 에너지의 측정 방식, 품질 지표의 정의, 그리고 정책 변경이 사용자가 느끼는 지연에 어떤 영향을 주는지까지 함께 제시할 필요가 있다.

III. 결론

본 논문의 핵심은 강화학습 자체의 이름이 아니라, 기지국에서 무엇을 조절하고 어떤 비용을 함께 고려하는지에 있다. 에너지 소비는 전력의 시간 적분으로 정의될 수 있으므로, 기지국 제어는 전력을 낮추거나 불필요한 동작 시간을 줄이는 방향으로 설계될 수 있다. 또한 O-RAN 관점에서는 Non-RT RIC과 Near-RT RIC의 역할이 나뉘어 정의되어 있어, 학습과 실행을 분리한 운영 형태를 설명하기에 적절하다.

탄소중립 관점에서 가장 중요한 점은 에너지 절감과 탄소 절감을 동일시하지 않는 것이다. GHG Protocol의 Scope 2 Guidance는 전력 사용으로 인한 배출량을 계산할 때 전력 사용량과 배출계수를 곱하는 방식을 권고한다. 따라서 강화학습의 보상 설계에서도 전력 사용량뿐 아니라 배출계수의 적용 범위와 데이터 출처를 명확히 해야 한다.

마지막으로, 절전 기능은 사용자 품질과 항상 맞물린다. ETSI TS 104 226은 더 깊은 슬립 모드가 더 큰 에너지 절감을 주지만 사용자 지연이 커질 수 있음을 분명히 설명한다. 따라서 향후 연구에서는 품질을 일정 수준 이상으로 유지하는 제약을 더 명확히 두고, 같은 조건에서 비교 가능한 측정과 보고 방식이 함께 정리될 필요가 있다. 이는 3GPP TR 32.972가 KPI 정의와 측정 방법, 그리고 에너지 효율 제어 프레임워크를 연구 범위에 포함한다고 밝힌 방향과도 일치한다.

ACKNOWLEDGMENT

본 논문은 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 정보통신기획평가원-대학ICT연구센터(ITRC)의 지원을 받아 수행된 연구임 (IITP-2026-RS-2024-00436887). 본 논문의 교신저자는 김중현임.

참 고 문 헌

- [1] D. V. Huynh, S. R. Khosravirad, V. Sharma, J. Kim, B. Canberk, and T. Q. Duong, "Carbon-Aware Edge Computing for Internet of Everything Networks: A Digital Twin Approach," *IEEE Internet of Things Journal*, vol. 12, no. 15, pp. 29240 - 29251, August 2025.
- [2] M. Choi, W. J. Yun, S. B. Son, S. Park, and J. Kim, "Joint Delay-Sensitive and Power-Efficient Quality Control of Dynamic Video Streaming Using Adaptive Super-Resolution," *IEEE Transactions on Green Communications and Networking*, vol. 8, no. 1, pp. 103 - 117, March 2024.