

독립형 전원계통의 자율적 전력분배기법 개발

김병민, 아드난 무하마드, 김명진*

충북대학교

qudals98@chungbuk.ac.kr, adnan@chungbuk.ac.kr, *mckim@chungbuk.ac.kr

Autonomous Power Sharing Method for Isolated Power Systems

Kim Byeong Min, Adnan Muhammad, Kim Myung Chin*

Chungbuk National Univ.

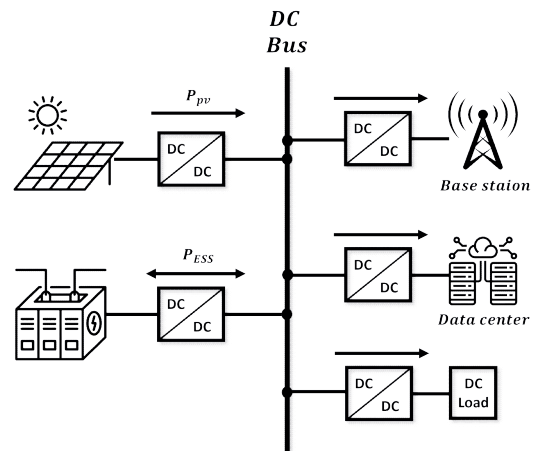
요약

본 논문에서는 독립형 DC 마이크로그리드에서의 자율적 전력 분배 기법을 중심으로 중앙집중식 제어 방식과 드롭(Droop) 기반 분산 제어 방식을 비교하였다. 중앙집중식 제어는 전역 최적화 및 전압 품질 관리가 용이하지만, 통신 인프라 의존성과 확장성의 한계가 존재한다. 반면 분산형 드롭 제어는 단순한 구현과 높은 확장성을 제공하나, 전압 강하 및 출력 불균형 문제가 발생할 수 있다. MATLAB/Simulink 환경에서 수행한 시뮬레이션을 통해 분산형 제어가 적용되었을 시에 일부 컨버터가 고장으로 버스에서 분리되더라도 나머지 자원이 자동적으로 출력을 조정하여 안정적으로 부하 전력을 분담하는 것을 확인하였다. 이를 통해 분산형 제어 방식이 독립형 DC 마이크로그리드에서의 자율적 전력 분배에 효과적임을 검증하였다.

I. 서론

최근 데이터센터와 통신 기지국과 같은 직류(DC) 부하 시설의 사용이 급격히 증가하고 있다. 이러한 DC 시스템은 기존 교류(AC) 시스템에 비해 효율성과 신뢰성이 높아, DC 마이크로그리드의 채택이 점차 확대되고 있다[1]. 특히 정보통신기술(ICT) 인프라의 급격한 확장은 글로벌 전력 소비 증가의 주요 원인이다. 백홀 라우터와 기지국이 전체 네트워크 전력 소비의 약 80%를 차지하고 있으며 모바일 비디오 트래픽의 급증으로 인한 에지 캐시 서버의 확대 역시 전력 소비 증가를 가속화하고 있다[2]. 이러한 문제를 해결하기 위한 대안으로 DC 마이크로그리드는 전력 변환 단계를 줄여 에너지 손실을 최소화하고 효율성을 향상시키는 기술로 주목받고 있다. 더불어 태양광(Photovoltaics: PV)과 같은 재생에너지원은 DC 전력을 직접 제공할 수 있어 AC-DC 변환의 비효율성을 제거하고, 배터리 및 슈퍼커패시터와 같은 DC 기반 에너지 저장 시스템(Energy Storage System: ESS)과 쉽게 통합된다. 따라서 DC 마이크로그리드는 ICT 인프라의 에너지 요구를 충족시키면서 에너지 효율성을 높이고 탄소 배출을 줄이는 지속 가능한 전력 시스템 구현의 핵심 기술로 자리 잡고 있다[3,4]. 그림 1은 PV, ESS 및 데이터센터, 통신기지국과 같은 부하가 DC 버스를 중심으로 연결된 DC 마이크로그리드의 예를 보여준다.

ICT 인프라의 24시간 무중단 운영 요구와 데이터센터 및 통신 기지국의 확산은 안정적이고 지속 가능한 전원 공급의 필요성을 한층 더 부각시키고 있다. 특히 외부 전력망과의 연결이 어려운 오지나 섬 지역, 또는 전력 공급이 불안정한 환경에서 태양광과 배터리만으로 구성된 독립형 DC 마이크로그리드(Islanded DC Microgrid)는 계통과 분리된 상태에서 운전되기 때문에, 전력 공급의 안정성을 확보하기 위한 효율적인 전력 분배 제어 전략이 핵심적이다. 이에 본 논문에서는 자율적 전력 분배 기법으로서 중앙집중식 제어 방식과 드롭(Droop) 기반 분산형 제어 방식을 비교하고자 한다.



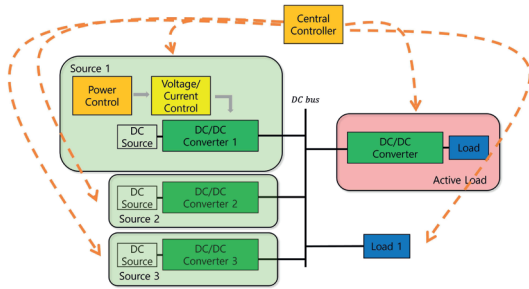
<그림 1> DC 마이크로 그리드의 예

II. 본론

2.1. 중앙집중식 제어 방식

중앙집중식 제어는 마이크로그리드의 모든 운영을 중앙 컨트롤러(CC, Central Controller)가 총괄하는 구조이다. 컨트롤러는 태양광 발전량, 배터리의 충전 상태(SOC), 부하 전력 요구량과 같은 정보를 수집하고 이를 기반으로 각 자원에 충방전 지령을 내린다. 이 방식의 가장 큰 장점은 전역 최적화를 수행할 수 있다는 점이다. 즉, 시스템 전체의 운전 효율을 높이고 또한 전압 품질 관리가 용이하다. 그러나 중앙집중식 제어에는 몇 가지 한계가 존재한다. 우선 고속의 통신 인프라에 의존하기 때문에 한 개의 자원이라도 통신 장애가 발생할 경우 전체 시스템이 마비될 수 있다. 또한 모든 계산을 중앙 컨트롤러가 담당하기 때문에 대규모 시스템에서는 계산량 증가로 인해 실시간 제어가 어려워질 수 있으며, 시스템 확장성이 떨어지는 문제도 발생

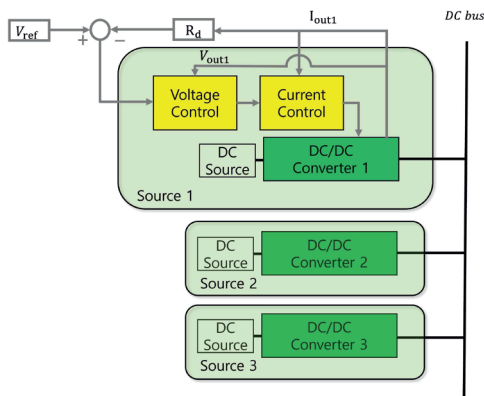
한다[5]. 따라서 중앙집중식 제어는 데이터 센터나 기지국처럼 분산 부하가 많은 환경에는 부담이 될 수 있다.



<그림 2> 중앙 집중식 제어 방식 블록도

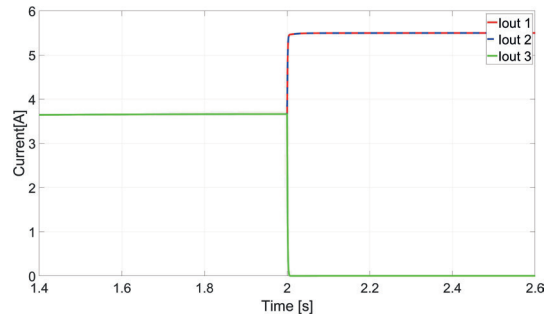
2.2. 분산형 제어 방식 (Droop 기반)

분산형 제어는 각 발전기나 배터리 같은 자원이 독립적으로 제어를 수행하는 구조이다. 대표적으로 사용되는 드롭(Droop) 제어는 전압-전류 특성 곡선을 기반으로 각 자원이 자동으로 전력을 분담하도록 한다. 통신 인프라 구축이 필요 없기 때문에 구현이 단순하고 확장성이 뛰어나 새로운 자원을 쉽게 추가할 수 있다. 따라서 데이터 센터나 기지국처럼 분산 부하가 많은 환경에 더 적합하다고 볼 수 있다. 하지만 드롭 제어에도 단점이 존재한다. 라인 임피던스의 차이로 인해 병렬 운전되는 장비의 전압 및 전류 분배에 불균형이 발생할 수 있다. 이로 인해 일부 장비에서는 허용 범위를 초과하는 과전압 혹은 과전류가 발생할 수 있으며, 이러한 현상이 반복적으로 누적될 경우 해당 ICT 장비의 신뢰성·수명 저하 등 안정성 문제가 직접적으로 나타날 수 있다. 또한 드롭 기반 제어의 특성상 전압 강하가 일어나기에 드롭 기반 제어만으로는 엄격한 전력 품질을 요구하는 시설에서는 단독 적용이 어렵고 따라서 전압을 보상하기 위한 2차제어가 필요하다[5].



<그림 3> 분산형 제어 방식 블록도

<그림 4>는 MATLAB/Simulink 환경에서 분산형 제어 방식을 적용하였을 때의 시뮬레이션 결과이다. 드롭 저항의 비율이 모두 동일한 세 개의 자원이 부하에 전력을 공급하는 상황을 시뮬레이션하였다. 시뮬레이션에서 2초 시점에 3번 컨버터의 고장을 가정하고 3번 컨버터를 버스(bus)로부터 분리하였다. 그 결과, 3번 컨버터가 분리된 이후에도 나머지 두 자원이 자동적으로 출력을 조정하여 부하 전력을 안정적으로 분담하는 것을 확인할 수 있다.



<그림 4> 분산형 제어 방식 시뮬레이션 결과

III. 결론

독립형 DC 마이크로그리드에서 자율적 전력 분배 기법을 고찰하였다. 중앙집중식 제어 방식은 전력 최적화와 전력 품질 관리 측면에서 장점이 있으나, 통신 장애에 취약하고 시스템 규모가 커질수록 실시간 제어와 확장성에 제약이 따른다. 반면, 드롭 기반 분산형 제어 방식은 단순한 구조와 우수한 확장성을 바탕으로 데이터 센터와 통신 기지국과 같은 분산 부하 환경에 적합함을 확인하였다. 시뮬레이션 결과, 드롭 저항 비율이 동일한 자원들이 부하를 분담하는 상황에서 특정 자원이 고장으로 버스에서 분리되더라도, 나머지 자원들이 자동으로 출력을 조정하여 안정적으로 전력을 분담하는 것을 확인하였다. 이는 분산형 제어 방식이 독립형 DC 마이크로그리드의 안정적 운용에 효과적임을 보여준다. 향후 연구에서는 드롭 기반 제어의 한계인 전압 강하 및 출력 불균형 문제를 개선하기 위하여 2차 제어 및 고급 에너지 관리 기법을 결합하고, 실험적 검증을 통해 실제 응용 가능성을 강화할 필요가 있다.

ACKNOWLEDGMENT

이 논문은 2025년도 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임(No. RS-2020-NR049604).

참 고 문 헌

- [1] D. Kumar, et al., "DC Microgrid Technology: System Architectures, AC Grid Interfaces, Grounding Schemes, Power Quality, Communication Networks, Applications, and Standardizations Aspects," IEEE Access, 5, pp. 12230-12256, 2017.
- [2] J. Kwak, et al., "Two Time-Scale Edge Caching and BS Association for Power-Delay Tradeoff in Multi-Cell Networks," in IEEE Transactions on Communications, vol. 67, no. 8, pp. 5506-5519, Aug. 2019.
- [3] H. Lee, et al., "Energy Management System of DC Microgrid in Grid-Connected and Stand-Alone Modes: Control, Operation and Experimental Validation. Energies, 14, 581, 2021.
- [4] R. Pradhan, et al., "Coordinated control strategy for a DC microgrid with low bandwidth communication," 2016 IEEE PEDES, Trivandrum, India, pp. 1-6, 2016.
- [5] B. Modu, et al., "DC-based microgrid: Topologies, control schemes, and implementations," Alexandria Engineering Journal, vol. 70, pp. 61-92, 2023.