

분할 드롭 제어를 이용한 비중앙 DC 마이크로그리드의 전력 제어

조성배*, 김경화†
 서울과학기술대학교

Power Management of Decentralized DC Microgrid using Piecewise Droop Control

Seong-Bae Jo*, Kyeong-Hwa Kim†
 Seoul National University of Science Technology

ABSTRACT

본 논문은 분할 드롭 제어방식을 사용해 작은 DC-Link 전압 변동과 전력 균형을 이룰 수 있는 비중앙 DC 마이크로그리드의 전력 제어방식을 제시한다. 제안된 전력 제어방식은 독립 운전 모드시 분할 드롭 제어를 사용하여 기존의 드롭 제어방식보다 전압 변동을 더욱 감소시켜 DC 마이크로그리드 시스템의 안정성 및 효율성을 향상시킨다. 분할 드롭 제어는 기존의 한 가지 드롭 계수만 존재했던 것과 달리 드롭 곡선의 구간을 나누어 각각의 구간마다 다른 드롭 계수를 적용하여 전압 변동을 최대한 줄여 안정적인 전력 제어를 달성한다. 제안된 제어방식의 성능과 타당성은 PSIM 시뮬레이션을 통해 입증된다.

1. 서론

전 세계적으로 기후변화협약 이행을 위해 화석연료를 대신하여 온실가스 배출량을 줄일 수 있는 신재생에너지에 관한 관심이 증가하고 있다. 이에 따라 신재생에너지를 안정적으로 활용하기 용이한 마이크로그리드에 대한 연구가 활발히 이루어지고 있다. 마이크로그리드는 분산전원이 연계되는 링크의 종류에 따라서 AC 마이크로그리드, DC 마이크로그리드로 나뉘어진다. 마이크로그리드를 구성하고 있는 분산 에너지원은 주로 DC로 구성되어 있으므로 DC 마이크로그리드는 AC 마이크로그리드보다 불필요한 전환단계를 줄일 수 있어 효율적이며, 또한 무효 전력 및 고조파 왜곡 등의 문제가 존재하지 않아 제어하기 용이하다.

DCL(Digital Communication Link)의 구성에 따라서 DC 마이크로그리드 제어방식은 중앙 제어방식, 분산 제어방식, 비중앙 제어방식으로 구분된다. 중앙 제어방식은 CC(Central Controller)와 구성 요소들이 DCL로 연결된다. 구성 요소에서 수집된 정보들은 DCL을 통해 CC로 전달되고 그를 바탕으로 CC에서 운영 모드를 결정하여 DCL를 통해 구성 요소들에게 전달한다. 분산 제어방식은 CC를 사용하지 않고 인접한 구성 요소들끼리만 DCL을 연결하여 정보를 교환하고 운영 모드를 결정한다. 비중앙 제어방식은 DCL을 사용하지 않고 운영 모드를 결정한다. 비중앙 제어방식은 타 제어방식에 비해 DCL 및 CC를 사용하지 않기 때문에 비용을 절감할 수 있고 높은 유연성을 가질 수 있다. 많은 경우, 비중앙 제어방식은 드롭 제어를 사용한다. 기존의 드롭 제어는 고정된 드롭 계수를 사용하여 시스템의 전력 균형을 유지한다^[1]. 하지만 고정된 드롭 계수를 사용하게 되면 DC-Link의 전압(V_{DC}) 변동이 크게 일어나게 된다.

본 논문에서는 기존의 드롭 제어를 개선하여 전력 균형 유지뿐만 아니라 공칭값으로 최대한 전압을 유지하며 시스템의 안정성을 향상시킬 수 있는 분할 드롭 제어를 제시한다. 본 분할 드롭 제어는 드롭 제어 구간을 몇 개의 구역으로 나누어 각 구역마다 다른 드롭 계수를 적용하여 전압 변동을 최소화하는 것을 목표로 한다. 제안된 분할 드롭 제어를 이용한 전력 제어 기법의 성능과 타당성은 PSIM 시뮬레이션을 통하여 입증된다.

2. DC 마이크로그리드의 전력 제어

2.1 DC 마이크로그리드의 구성

그림 1은 계통, 풍력 터빈, 배터리, 부하로 이루어진 비중앙 DC 마이크로그리드의 구성도를 나타낸다. 각각의 구성 요소들은 DCL없이 자체적으로 측정할 값을 바탕으로 각각의 운영 상태를 결정한다.

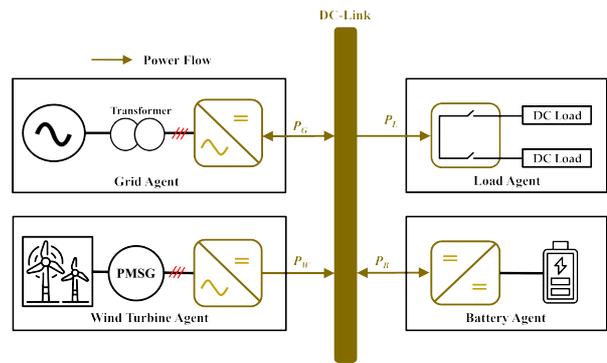


그림 1 DC 마이크로그리드의 구성도

2.2 전력 제어 기법

본 연구에서는 계통 연계 모드에서는 계통이 VCM(Voltage Control Mode)를 통해 V_{DC} 을 공칭값으로 제어하며 전력 균형을 유지하고, 독립 운전 모드에서는 전력 균형 유지 및 전압 제어를 위해 구역을 나누어 다른 드롭 계수를 적용하는 분할 드롭 제어를 사용한다.

한 가지 드롭 계수만을 적용하는 기존의 드롭 제어와는 달리 구역마다 다른 드롭 계수를 적용해 전압의 변동을 최대한 줄일 수 있다. 본 논문에서는 분산 전원의 최대 출력을 동일한 크기로 나누어 총 3개의 구역으로 나누었다. 분산 전원의 상태에 따라 구역의 수는 조정할 수 있다. 분산 전원의 전압 제어

를 위해 제안된 드롭 공식은 다음과 같이 표현된다.

$$V_{ref}^i = V_{nom,j}^i - R_{D,j}^i (P^i + (j-1) \times W^i) \quad (1)$$

여기서 V_{ref}^i 는 에이전트 i 의 전압 기준을 나타내며, V_{nom}^i 은 에이전트 i 의 j 번째 구역의 공칭 전압, $R_{D,j}^i$ 는 에이전트 i 의 j 번째 구역에서의 드롭 계수, P^i 는 에이전트 i 의 출력 전력, W^i 는 에이전트 i 의 한 구역 너비를 나타낸다. $R_{D,j}^i$ 를 구하는 식은 다음과 같다.

$$R_{D,j}^i = \frac{V_{nom,j}^i - V_{L,j}^i}{W^i} = \frac{\Delta V_j^i}{W^i} \quad (2)$$

$V_{L,j}^i$ 는 에이전트 i 의 j 번째 구역 최소 전압을 나타낸다. j 는 나뉜 구역의 주소를 나타내며 최대 크기는 3이다. j 를 최신화하는 식은 다음과 같다.

$$j = \begin{cases} j_{pre} + 1, & \text{if } P^i + j_{pre} \times W^i < \alpha^- \\ j_{pre}, & \text{if } \alpha^- < P^i + j_{pre} \times W^i < \alpha^+ \\ j_{pre} - 1, & \text{if } P^i + j_{pre} \times W^i > \alpha^+ \end{cases} \quad (3)$$

j_{pre} 는 이전의 j 의 값이며, α 는 임계값을 나타낸다.

2.2.1 풍력 터빈 분할 드롭 제어

그림 2는 풍력 터빈의 드롭 커브를 나타낸다. 본 논문에서의 풍력 터빈 최대 출력이 1500W이므로 W^i 는 500W로 구성한다. 그림과 같이 각 구역마다 다른 드롭 계수를 적용하여 최대한 전압 변동을 줄인다. 그림 2에서 점선은 기존의 드롭 제어방식을 사용할 때의 드롭 커브를 나타낸다. V_{DC} 가 400V 이하로 감소하면 풍력 터빈의 제어 방식은 MPPT(Maximum Power Point Tracking) 모드로 변경된다.

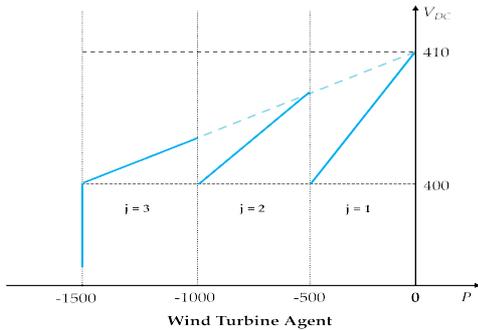


그림 2 풍력 터빈의 드롭 커브

2.2.2 배터리 분할 드롭 제어

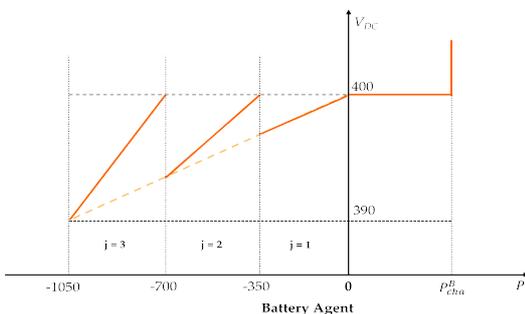


그림 3 배터리의 드롭 커브

그림 3은 배터리의 드롭 커브를 나타낸다. 본 논문에서의 배터리 최대 출력은 1050W이므로 W^B 는 350W로 구성한다. 점선

은 기존 드롭 제어방식을 사용할 때의 드롭 커브를 나타낸다. V_{DC} 가 400V를 초과하면 배터리의 제어방식은 BCCM(Battery Current Control Mode)로 변경되며 P_{cha}^B 의 크기로 충전을 시작한다.

3. 시뮬레이션 결과

본 분할 드롭 제어 기법의 성능과 타당성을 입증하기 위해 그림 1의 구성에서 계통을 제외한 독립 운전 모드 상태인 DC 마이크로그리드를 대상으로 PSIM을 활용해 시뮬레이션을 진행하였다. 그림 4는 제안된 기법과 기존 드롭제어 기법[1]의 V_{DC} 변동의 비교 시뮬레이션 결과를 나타낸다.

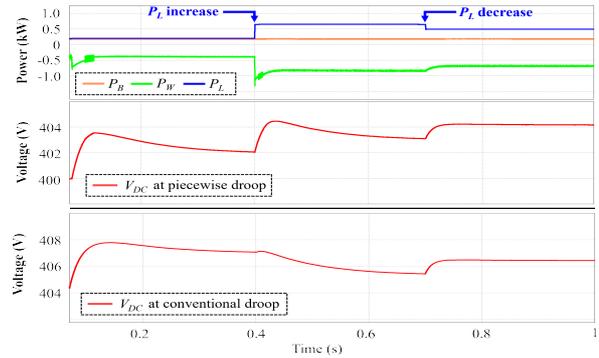


그림 4 DC-Link 전압 변동 비교 시뮬레이션 결과

DC 마이크로그리드는 독립 운전 모드로 시작되며 V_{DC} 가 400V 이상이므로 배터리가 BCCM모드로 충전되고 풍력 터빈이 분할 드롭 제어를 하고 있음을 볼 수 있다. 0.4 초 이전에 풍력 터빈이 -400W로 발전하는 경우 기존의 드롭 제어에서는 V_{DC} 가 정상상태에서 407V로 유지되는 반면, 분할 드롭 제어에서는 V_{DC} 가 402V로 유지되어 변동이 줄어드는 모습을 보인다. 0.4초에서 P_L 가 증가하며 이에 따라 풍력 터빈의 드롭 곡선이 $j=2$ 구역으로 변경되며 드롭 계수가 변화하게 되지만 여전히 기존의 드롭 제어보다 V_{DC} 를 공칭값에 더 가깝게 유지하고 있다는 것을 볼 수 있다. 0.7초에서 P_L 가 감소해도 분할 드롭 제어방식이 기존의 방식보다 V_{DC} 변동이 적은 것을 확인할 수 있다.

4. 결론

본 논문은 DC 마이크로그리드의 안정성을 높이기 위해 기존의 드롭 제어를 개선한 분할 드롭 제어를 제시하였다. 독립 운전 모드에서 분할 드롭 제어를 사용함으로써 기존의 드롭 제어보다 전압 변동이 작고 더욱 안정적으로 전력 관리가 가능함을 시뮬레이션을 통해 확인하였다.

이 논문은 2024 년도 정부 (교육부)의 재원으로 한국연구재단의 기초연구사업 지원을 받아 수행된 것임 (NRF-2019 R1A6A1A03032119). 이 성과는 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(NRF-2022R1F1A1064350). 본 과제(결과물)는 교육부와 한국연구재단의 재원으로 지원을 받아 수행된 3단계 산학협력 선도대학 육성사업 (LINC 3.0)의 연구결과입니다.

참고 문헌

- [1] A. F. Habibullah, F. A. Padhilah, and K. H. Kim, "Decentralized Control of DC Microgrid Based on Droop and Voltage Controls with Electricity Price Consideration", Sustainability, vol. 13, pp. 11398, 2021.