

직류 마이크로그리드의 평균 전압 변동을 최소화하기 위한 드롭 제어 전원의 위치 선정 기법

고병선*, 이기영*, 김래영*, 김태훈**, 김주용**
한양대학교*, 한국 전력 공사 전력연구원**

A Positioning Method of Droop Controlled Sources for Minimum Average Voltage Variation in a DC Microgrid

Byoung Sun Ko*, Gi Young Lee*, Rae Young Kim*, Ju Yong Kim**, Tae Hoon Kim**
Hanyang University*, Korea Electric Power Research Institute (KEPRI)**

ABSTRACT

본 논문에서는 전압 민감도를 통해 직류 마이크로그리드의 전압 변동을 최소화하기 위한 드롭 제어 전원의 위치 선정 기법을 제시한다. 전압 민감도를 도출하기 위해 전력 흐름 분석을 수행하였으며, 드롭 제어의 특성을 반영하기 위해 드롭 버스를 도입하였다. 그러나 드롭 버스를 적용함으로써 전력망의 전압 민감도는 드롭 제어 전원의 위치에 의존하게 된다. 따라서 드롭 제어 전원의 위치에 따른 전압 민감도를 분석하고 이를 비교하여 DC MG의 평균 전압 변동이 최소화되는 위치를 결정하였다. 제안한 드롭 제어 전원의 위치 선정 기법의 결과를 PSCAD/EMTDC 시뮬레이션을 통해 검증하였다.

1. 서론

전력 수요의 지속적인 증가 및 지구 온난화와 같은 환경문제의 대두로 신재생 에너지원(Renewable Energy Source, RES)에 대한 수요가 증가하고 있다. 이에 따라, RES에 의해 생산되는 전기에너지를 활용하여 전력망의 효율을 향상시키기 위한 마이크로그리드(Micro Grid, MG)에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다^[1].

MG를 제어하는 방식에 있어서는 크게 중앙 집중 제어 방식과 분산제어 방식으로 나뉜다. 중앙 집중 제어 방식은 중앙 제어기에서 최적 에너지 흐름을 계산하고 각 기기에 지령값을 보내기 때문에 최적화된 MG의 운영을 달성할 수 있다. 그러나 단일 지점 사고 발생 시 운영이 중단되는 등의 문제점이 존재한다. 이러한 문제를 해결하기 위해 드롭 제어를 기반으로 한 분산제어 방식이 연구 되어 왔다. 드롭 제어는 가장 일반적인 자동 제어 전략으로써 가상 임피던스 제어 루프를 추가하여 전압 지령을 변경하고 이에 따라 통신 네트워크 없이 전압 조정 및 부하 분담을 수행하는 제어방식이다.

그러나 분산 제어 방식의 MG 전력망에서 드롭 제어 전원은 가상 임피던스 제어 루프에 의해 전압이 변동되는 수하특성을 가지게 되며, 선로 저항의 영향에 의해 위치에 따라 전압 및 부하 분담이 변동된다. 본 논문에서는 드롭 제어를 기반으로 한 분산 제어에 있어 직류 마이크로그리드(DC Micro Grid, DC MG)의 전압 변동을 최소화하기 위한 드롭 제어 전원의 위치 선정 기법을 제안한다.

2. 직류 마이크로그리드의 전력 흐름 분석

2.1 전력 흐름 분석

n개의 버스로 구성된 직류 마이크로그리드에서 노드 분석을 통해 버스 i의 전류 i_i 및 전력 p_i 를 식(1), (2)와 같이 유도할 수 있다. 이때, 단위법을 적용하였다.

$$i_i = \sum_{j=1, j \neq i}^n g_{ij}(v_i - v_j) \quad (1)$$

$$p_i = v_i i_i = v_i \sum_{j=1, j \neq i}^n g_{ij}(v_i - v_j) \quad (2)$$

여기서, v_i 는 버스 i의 전압을 나타내고 g_{ij} 는 버스 i와 j 사이의 어드미턴스를 나타낸다.

식 (2)를 통해 직류 마이크로그리드의 전력 p 를 계산하고 이를 전압에 대하여 편미분하면 식 (3)의 자코비안 행렬을 구할 수 있다.

$$[J] = \frac{\Delta p}{\Delta v} = \begin{bmatrix} \partial p_1 / \partial v_1 & \cdots & \partial p_1 / \partial v_n \\ \vdots & & \vdots \\ \partial p_n / \partial v_1 & \cdots & \partial p_n / \partial v_n \end{bmatrix} \quad (3)$$

최종적으로 식(3)에 역행렬을 취함으로써 각 버스의 전력 변화에 대한 전압 변동율을 나타내는 전압민감도 [S]를 식(4)와 같이 유도할 수 있다.

$$[S] = \Delta v / \Delta p = [J]^{-1} \quad (4)$$

식 (4)의 전압 민감도를 통해 임의의 버스에서의 출력 변동에 대한 전압 변동의 예측이 가능해진다.

2.2 드롭 버스 모델

드롭 제어는 출력 전류 i_o 를 피드백 하여, 가상 임피던스 R_D 를 통해 새로운 전압 지령 v_o^* 을 생성한다.

$$v_o^* = v_{nom} - R_D i_o \quad (5)$$

식 (5)에서 알 수 있듯이, 드롭 제어 전원은 v_{nom} 의 크기를 갖는 이상적인 전압원과 가상 임피던스 R_D 를 내부저항으로 하는 드롭 버스 모델로 모델링 할 수 있으며, 이는 드롭 제어의 수하특성을 반영하게 된다. 따라서 DC 마이크로그리드의 전력 흐름 분석 시, 드롭 제어 전원을 드롭 버스 모델로 모델링하여 해석한다.

3. 제안한 드롭 제어 전원의 위치 선정 기법

드롭 제어 전원을 드롭 버스 모델로 모델링 한 경우, 드롭 제어 전원의 위치에 따라 전력망의 전압 민감도가 변하게 된다. 즉, 드롭 제어 전원이 전력망에 추가되는 경우 드롭 제어 전원의 위치에 따라 전력망의 전압 변동이 달라지는 것을 의미

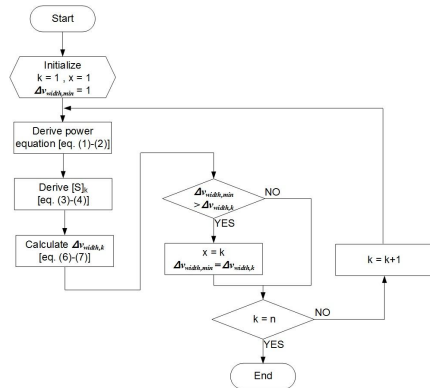


그림 1 제안한 위치 선정 기법의 흐름도
Fig. 1 Flow chart of proposed positioning method

한다. 따라서 본 논문에서는 평균 전압 변동 폭 Δv_{width} 을 정의하여 드롭 제어 전원의 위치에 따라 Δv_{width} 를 계산하고 비교하는 과정을 통해 최종 위치를 결정하는 기법을 제안한다.

전체 버스의 수가 n 인 전력망에서 드롭 제어 전원을 임의의 버스 k 에 추가하고 버스 j 의 전력이 정격 용량 Δp 만큼 변동하였다고 가정하는 경우 평균 전압 변동 Δv_{avg} 및 평균 전압 변동 폭 $\Delta v_{width,k}$ 를 식 (6), (7)과 같이 정의한다.

$$\Delta v_{avg,k}^{\pm} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (\pm \Delta v_{i,k}) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n s_{ij} (\pm \Delta p_{j,k}) \quad (6)$$

$$\Delta v_{width,k} = \Delta v_{avg,k}^{+} - \Delta v_{avg,k}^{-} \quad (7)$$

그림 1은 제안한 위치 선정 기법의 흐름도를 보여준다. 우선 DPS 버스 위치 k , DPS 위치 변화에 따른 최소 평균 전압 변동 폭 $\Delta v_{width,min}$, $\Delta v_{width,min}$ 에서의 DPS 버스 위치 x 가 각각 초기화가 된다. 다음으로 식 (1) (2)를 통해 DPS가 버스 k 에 위치하였을 때의 전력망 전력 p 를 연산한다. 이후 식 (3) (4)를 적용하여 전압 민감도 $[S]_k$ 를 연산하며, 식 (6) (7)을 통해 DPS가 버스 k 에 위치했을 때의 $\Delta v_{width,k}$ 을 연산한다. 최종적으로 $\Delta v_{width,min}$ 을 찾기 위해 계산한 $\Delta v_{width,k}$ 와 $\Delta v_{width,min}$ 의 대소비교가 수행된다. k 를 증가시켜가며 전력망의 버스 수 n 만큼 과정을 반복하게 되면 전력망의 Δv_{width} 를 최소로 할 수 있는 버스 위치인 x 가 결정된다.

표 1 5-bus 직류 마이크로그리드에서 기기의 위치 및 정격
Table 1 Ratings and location of units in 5-bus DC MG

Location	Unit	Rating
Bus 1	에너지 저장 장치	110 [kW]
Bus 2	부하, PV	25, 110 [kW]
Bus 3,4,5	부하	25 [kW]

표 2 5-bus 직류 마이크로그리드의 선로정수
Table 1 System parameters of 5-bus DC MG

V_{nom}	1500 [V]	g_{12}	1.6667 [Ω^{-1}]
P_{nom}	110 [kW]	g_{23}	1.6667 [Ω^{-1}]
$g_{D,ESS}$	0.7857 [Ω^{-1}]	g_{34}	2.2222 [Ω^{-1}]
$g_{D,ESS,odd}$	0.7857 [Ω^{-1}]	g_{45}	2.2222 [Ω^{-1}]

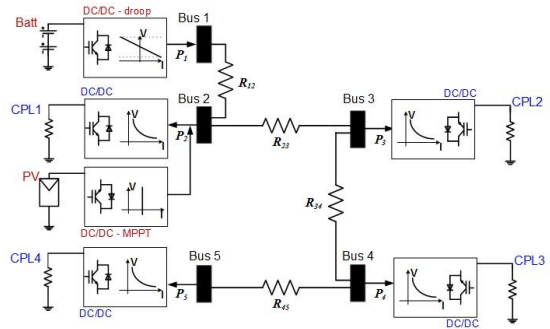


그림 2 5-bus DC MG의 구조
Fig. 2 Structure of 5-bus DC MG

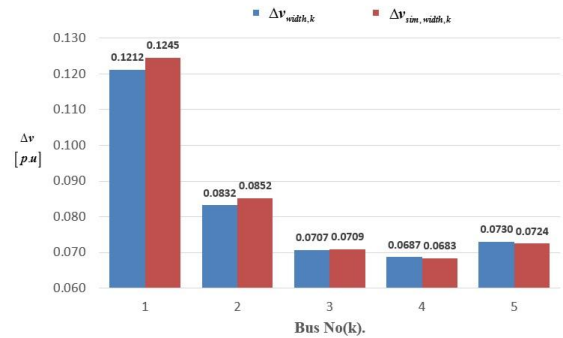


그림 3 모의실험 결과
Fig. 3 Simulation result

4. 모의실험

제안한 위치 선정 기법을 검증하기 위하여, 그림 2의 5 bus DC MG를 대상으로 PSCAD/EMTDC 시뮬레이션을 수행하였다. 시뮬레이션에서 적용된 기기별 위치 및 정격용량, 선로정수는 표1 및 표2와 같다.

그림 3는 제안한 기법을 통해 계산한 $\Delta v_{width,k}$ 와 시뮬레이션을 통해 측정된 $\Delta v_{sim,width,k}$ 을 보여준다. 드롭 제어 전원의 위치 선정을 위해 $\Delta v_{width,k}$ 에 대소 비교를 수행하면 드롭 제어 전원이 버스 4에 위치한 경우 최솟값인 $\Delta v_{width,min}$ 값을 갖는 것을 확인할 수 있다. 이에 따라 버스 4를 드롭 제어 전원의 위치로 선정한다. 시뮬레이션을 통해 측정된 $\Delta v_{sim,width,k}$ 에도 동일한 결과를 볼 수 있다.

5. 결론

본 논문에서는 직류 마이크로그리드 배전망에서 평균 전압 변동을 최소화하기 위한 드롭 제어 전원의 위치 선정 기법을 제안하였다. PSCAD/EMTDC 시뮬레이션을 통해 제안한 기법의 타당성을 검증하였다.

본 연구는 한전 전력연구원에서 지원하는 2015년도 “저압 직류배전망 제어를 위한 기초 기술 연구”과제의 지원을 받아 수행되었음.

참고 문헌

[1] R. H. Lasseter, “MicroGrids” in 2002 IEEE Power Engineering Society Winter Meeting Conference Proceedings (Cat. No.02CH37309), 2002, Vol. 1, pp.305-308