

전압 변동 보상을 이용한 직류 마이크로그리드의 에너지 관리 기법

고병선¹, 이기영¹, 김석웅², 김래영[†]

Energy Management Method of DC Microgrids by Using Voltage Compensation Term

Byoung-Sun Ko¹, Gi-Young Lee¹, Seok-Woong Kim², and Rae-Young Kim[†]

Abstract

An energy management method of DC microgrids using voltage compensation term is proposed in this study. Droop control is often implemented to operate the DC microgrid. However, the droop control necessarily generates voltage variation. Energy flow is also difficult to control because the droop control mainly focuses on proportional load sharing. To solve these problems, the voltage compensation term based on the low-bandwidth communication is used to determine the operating band of the converter. Energy management and voltage variation minimization can be achieved by judging the operating band according to the magnitude of voltage compensation term. The validity of the proposed method is verified by simulation and experiments.

Key words: DC microgrid, Voltage restoration, DC bus signaling, Low-bandwidth communication, Communication delay

1. 서 론

전력 수요의 지속적인 증가 및 지구 온난화와 같은 환경문제의 대두로 신재생 에너지원(RES, Renewable energy source)에 대한 수요가 증가하고 있다. 이에 따라, 전력망을 소 규모화 함으로써 RES에 의해 생산되는 전기에너지의 적절한 관리를 통해 전력망의 효율을 향상시키기 위해 마이크로그리드(MG, Microgrid)에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다^[1]. 특히, DC MG는 주파수 동기화, 무효 전력에 대한 문제가 없으며 직류 특성을 갖는 RES와 에너지 저장 장치(ESS, Energy storage system)를 연계하는 경우, 변환 단계의 감소로 높은 효율을 갖는 장점이 있다.

DC MG의 에너지 관리 및 전압 조절을 수행하기 위한 제어 구조는 크게 중앙 집중 제어 구조와 비 중앙 집중 제어 구조로 나눌 수 있다^[2]. 중앙 집중 제어 구조에서 중앙 제어기는 계통 연계형 컨버터, ESS 등의 전력변환 장치(PEC, Power electronics converter) 그리고 RES나 부하와 같은 다양한 하위기기들로부터 지역 정보를 수집하고, 제어 지령을 계산한다. 계산된 제어 지령은 통신 네트워크를 통해 하위기기로 전달되며 하위기기는 제어 지령에 따라 동작한다. 중앙 집중 제어 방식은 로컬 정보와 예측 정보를 기반 하여 DC MG의 에너지 흐름을 계산하고 이를 토대로 각 하위기기의 지령값을 계산하기 때문에 최적화된 DC MG의 운영을 달성할 수 있다. 그러나 데이터 축적을 위한 대용량의 메모리가 필요하며, 통신 네트워크에 대한 의존성이 단일 지점 사고와 같은 문제점을 야기한다.

이러한 문제를 해결하기 위해 비 중앙 제어 구조에 대한 연구가 진행 되어 왔다. 비 중앙 제어 구조는 각 PEC가 국부적 특성에 따라 개별적으로 제어되는 구조이다. 이에 따라 중앙제어기 없이 DC MG의 운영이 가능해 진다. 이 중 드롭 제어는 출력 전류나 출력 전력을 피드백 하여 드롭 계인을 통해 전압 지령값을 가변하는 제어 기법이다. 드롭 계인은 전원이나 PEC의 정격 용량

Paper number: TKPE-2018-23-5-5

Print ISSN: 1229-2214 Online ISSN: 2288-6281

[†] Corresponding author: rykim@hanyang.ac.kr,
Dept. of Electrical Bio-Engineering, Hanyang University
Tel: +82-2-2220-0341 Fax: +82-2-2220-4825

¹ Dept. of Electrical Engineering, HYPEC-EECS Lab,
Hanyang University

² Basic Research Center for Electric Power, KEPCO
Research Institute

Manuscript received Jul. 12, 2018; revised Jul. 27, 2018;
accepted Aug. 14, 2018

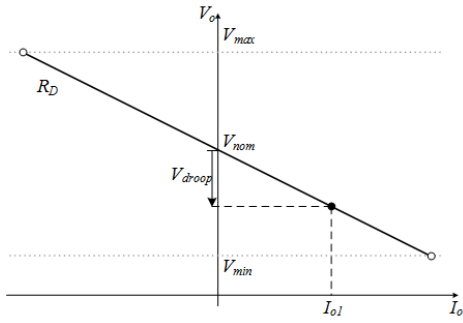


Fig. 1. Output voltage-output current characteristic curve of droop control.

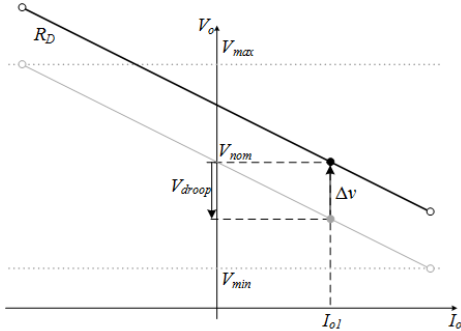


Fig. 2. Output voltage-output current characteristic curve of voltage shifting method.

으로부터 계산되며 이를 통해 PEC들간의 부하 분배가 결정 된다^[3]. 하지만 모든 PEC가 정격 용량에 비례하는 부하 분담을 수행하기 때문에 다양한 전원의 특성을 반영한 출력 스케줄링을 수행하지 못하며 이로 인해 DC MG의 적절한 에너지 관리가 수행되지 않는다. 또한 드롭 계인에 의해 부하에 따라 필연적인 출력 전압 변동이 발생한다. 특히, 선로 저항이 큰 DC MG의 경우, 부하단에서의 더 큰 전압 변동을 야기하게 되며 이는 DC MG의 power quality를 감소시킨다.

드롭 제어의 에너지 관리 측면의 문제점을 극복하기 위해 직류 버스 신호법(DBS, DC bus signaling) 기법의 연구가 진행되어 왔다. DBS는 DC 전압 레벨에 따라 PEC의 동작 밴드를 구분함으로써 DC MG의 에너지 관리를 수행하는 제어 기법이다^{[4],[5]}. 이 기법은 다양한 전원의 특징을 고려하여 활용 우선순위를 정의하며, DC 전압 레벨을 세분화함으로써 동작밴드를 구분한다. PEC는 동작 밴드에 따라 드롭 제어 혹은 일정 전류 제어를 수행하도록 설계된다. DBS 기법은 개별적인 출력 전압 값을 통해 동작 밴드를 판단하기 때문에 구현이 쉬우며 DC MG의 신뢰도를 향상시킬 수 있다. 하지만, DC 전압을 통해 동작 밴드를 판단하는 특징은 결국 드롭 제어의 필연적인 전압 변동을 극복할 수 없게 한다.

한편, 기기 간 통신을 기반으로 한 분산형 제어 구조를 통해 드롭 제어의 전압 변동을 보상하기 위한 연구가 진행되어 왔다^{[6],[7]}. 통신 기법을 통해 인접 기기의 정보를 수집하여 전압 변동 보상항을 계산하고 이를 전

압 지령값에 반영함으로써 전압 변동을 보상하는 전압 변동 보상법(VS, voltage shifting)기법이 연구 되었다. 하지만 기존 기법들은 PEC간의 비례적인 부하 분담을 목적으로 수행되었기 때문에, 다양한 전원의 활용을 고려한 에너지 관리 측면에는 연구가 부족하다.

본 논문에서는 DC 버스의 전압 변동을 최소화함과 동시에 다양한 전원의 활용도를 반영한 에너지 관리를 위해 전압 변동 보상항을 이용한 DC MG의 에너지 관리 기법을 제안한다. 제안하는 방법은 저 대역폭 통신망(LBC, Low bandwidth communication)을 통한 기기 간 통신을 기반으로 드롭 제어의 전압 변동을 보상하기 위한 평균 전압 제어기를 통한 VS기법을 수행한다. VS기법에 의한 전압 변동 보상항은 기기 간 출력 전압 정보에 의해 계산되므로 DC MG의 에너지 상태를 나타내는 지표가 된다. 이에 따라, 각각의 PEC는 전압 변동 보상항의 값에 따라 개별적으로 동작 밴드를 판단하여 에너지 관리를 수행하게 된다. 제안한 방법은 중앙 집중 제어 방식에 비해 간소화된 통신 네트워크로 동작하며, 중앙 제어기가 없기 때문에 단일 지점 사고가 발생하지 않는다. 제안한 기법의 유효성을 PSCAD/EMTDC를 이용한 시뮬레이션 및 실험을 통해 검증하였다.

2. 전압 변동 보상항을 이용한 직류 마이크로그리드의 에너지 관리 기법

2.1 드롭 제어

드롭 제어는 전압원의 내부 임피던스를 모의하는 드롭 계인을 통해 PEC간의 부하분담을 수행하는 제어 방법이다. 그림 1은 드롭 제어의 전압-전류 특성 곡선을 보여준다. 그림에서 볼 수 있듯 드롭 제어는 선형적인 전압-전류 특성을 나타낸다. 특성 곡선의 기울기는 드롭 계인을 나타내며 일반적으로 식 (1)과 같이 결정된다. 드롭 제어를 적용함으로써 PEC의 출력 전압은 식 (2)로 나타내어진다^[3].

$$R_D = \frac{(V_{nom} - V_{min}) V_{min}}{P_{rated}} \quad (1)$$

$$V_o = V_{nom} - R_D I_o = V_{nom} + V_{droop} \quad (2)$$

여기서, V_{nom} , V_{min} , P_{rated} , I_o , V_o , R_D , V_{droop} 는 각각 드롭 제어의 기준 전압, DC MG의 최소 허용 전압, PEC의 정격 용량, PEC의 출력 전류, 출력 전압, 드롭 계인, 출력 전압 변동을 나타낸다. 식 (1)의 드롭 계인은 다양한 전원의 활용에 대해 고려하지 않았기 때문에 다양한 부하나 발전 상황에서 오직 정격 용량에 비례하는 출력 스케줄링을 수행하는 문제가 있다. 예를 들어, 신재생 에너지원의 출력이 급격하게 증가하거나, 에너지 저장 장치의 state of charge(SoC)의 한계로 인해 DC MG의

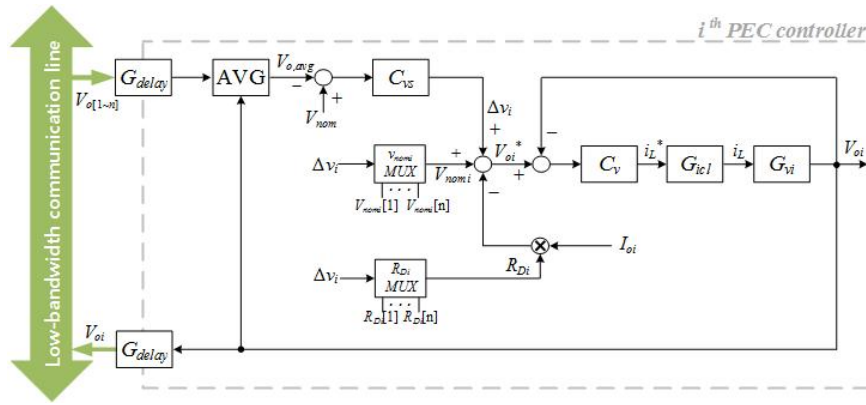


Fig. 3. Control block diagram of the proposed method.

에너지 상태가 변경되는 경우에도 드롭 제어는 오직 정격 용량에 비례하는 동작을 수행하게 된다. 또한, 드롭 제어를 적용함으로써 필연적인 출력 전압 변동 V_{droop} 이 발생하게 된다. 그림 1에서 볼 수 있듯, 전형적인 특성 곡선은 부하에 따라 출력 전압을 변동시키며 이는 식 (2)을 통해 확인할 수 있다. 즉, 드롭 제어에 의한 V_{droop} 를 통해 DC MG의 에너지 상태를 파악할 수 있다.

2.2 전압 변동 보상 기법

VS기법은 드롭 제어의 필연적인 전압 변동을 최소화하여 DC MG의 전압을 기준 전압으로 유지하기 위한 제어 기법이다. 그림 2는 VS 기법의 전압-전류 특성 곡선을 보여준다. 드롭 제어의 특성 곡선과 비교했을 때 Δv 의 수직 이동이 발생한다. 이에 따라 PEC의 출력 전압은 식 (3)와 같이 나타난다^{[8],[9]}.

$$V_o = V_{nom} + V_{droop} + \Delta v \tag{3}$$

$$V_{droop} = -\Delta v \tag{4}$$

여기서, Δv 는 전압 변동 보상량을 나타낸다. 드롭 제어는 PEC의 출력 전압에 V_{droop} 을 발생시키고 이는 VS의 전압 변동 보상량 Δv 를 통해 보상된다. PEC의 출력 전압이 V_{nom} 과 같다고 가정하면, V_{droop} 과 Δv 의 관계는 식 (4)으로 나타낼 수 있다.

식 (4)와 같이 Δv 는 V_{droop} 를 상쇄시키기 때문에 DC MG의 전압 변동을 최소화 할 수 있다. 하지만, 드롭 제어와 동일하게 다양한 전원의 활용을 고려한 에너지 관리의 수행하지 못하는 문제점이 있다.

2.3 제안하는 에너지 관리 기법

그림 2 및 식 (4)에서 볼 수 있듯, Δv 는 DC MG의 에너지 상태를 파악할 수 있는 V_{droop} 과 같다. 즉, Δv 를 통해 DC MG의 동작 상태를 파악할 수 있는 지표로써 사용할 수 있다. 이에 따라, 제안한 기법에서 Δv 의 크기를 통해 동작 밴드를 판단하게 된다. 그림 3은 제안한 에너지 관리 기법의 제어 블록도를 보여준다. 그림에서 볼

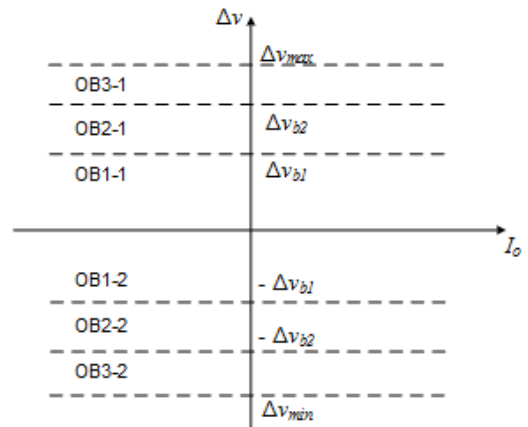


Fig. 4. Operating band of the proposed method.

수 있듯, LBC를 통해 평균 출력 전압 $V_{o,avg}$ 을 계산하고 추가적인 제어기 C_{vs} 를 통해 전압 변동 보상을 수행한다. Δv_i 는 Multiplexer를 통해 드롭 제어 루프의 기준 전압 V_{nomi} 와 드롭 계인 R_{Di} 을 변경하게 되며 이를 통해 DC MG의 에너지 관리를 수행하게 된다. 여기서, i 는 DC MG를 구성하는 i -번째 PEC를 나타낸다. 위와 같은 에너지 관리를 수행하기 위해 미리 동작 밴드의 정의와 동작 밴드별 드롭 제어의 드롭 계인, 기준 전압의 설계 과정이 필요하다.

그림 4는 제안한 기법의 동작 밴드(OB, Operating band)를 보여준다. Δv 의 크기에 따라 OB1, 2, 3로 구분된다. 또한 OB는 극성에 따라 OB1-1, OB1-2로 구분된다. OB1은 DC MG의 에너지 균형이 유지되는 구간으로 부하와 분산 전원은 큰 출력 변동 없이 동작하며 드롭 제어 유닛의 충, 방전을 통해 DC MG의 전압을 안정적으로 유지할 수 있는 구간이다. OB2는 DC MG 내에서 순간적인 에너지 불균형이 발생하여 OB1을 벗어나는 구간을 나타낸다. OB2에서는 OB1에서보다 큰 전압 변동이 존재하지만 드롭 제어 유닛의 충, 방전을 통해 직류전압을 안정적으로 운영할 수 있다. 마지막으로 OB3는 DC MG 내에서 심각한 에너지 불균형이 발생하는 경우를 말한다. 앞선 OB와 비교했을 때 가장 큰 출력 및 전압 변동이 발생하게 되는 구간이다. 분산전원이나 부하

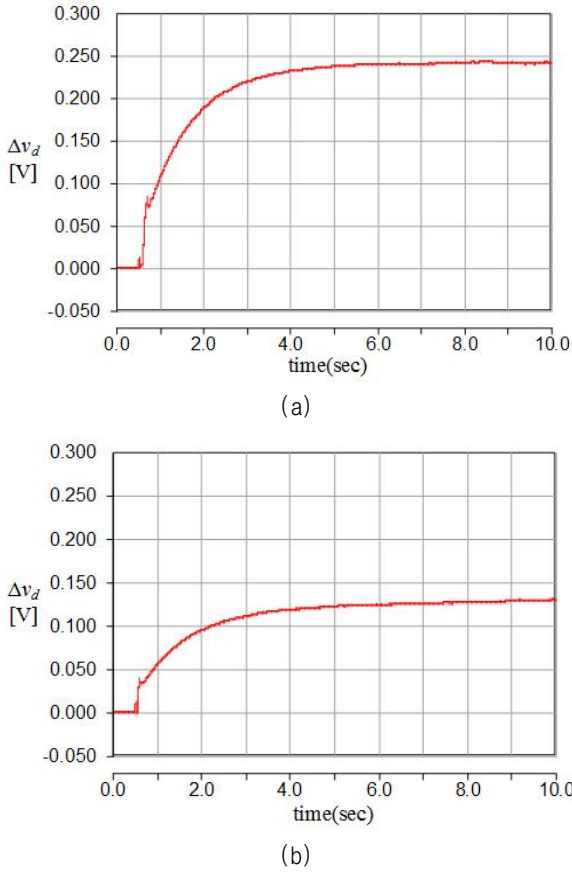


Fig. 5. Simulation results about difference between voltage compensation term with different communication delay. (a) $\tau = 100\text{ms}$, (b) $\tau = 50\text{ms}$.

의 고장, 탈락이나 독립 운전, ESS의 자유로운 충, 방전이 불가능한 상황을 예로 들 수 있다. 제한한 기법에서 각각의 PEC는 Δv 를 Δv_{b1} , Δv_{b2} 와 비교함으로써 개별적으로 동작 밴드를 판단한다. 각각의 동작밴드에서 V_{nom} 와 R_{Di} 을 설계함으로써 DC MG의 에너지 관리가 가능하다.

3. 통신 지연의 영향

제한하는 제어 기법에서 전압 변동 보상항 Δv 는 DC MG의 전압 변동을 최소화 할 뿐만 아니라, DC MG의 동작 밴드를 판단한다. Δv 는 식 (5)와 같이 DC MG의 기준전압과 PEC의 평균 전압을 통해 계산된다.

$$\Delta v_i = C_{vs} (V_{nom} - V_{o,avg}) \quad (5)$$

그림 3에서 볼 수 있듯, $V_{o,avg}$ 는 식 (6)과 같이 LBC를 통한 인접 기기의 출력 전압 정보에 의해 계산되며 식 (7)의 통신 지연의 영향을 받는다. 이러한 통신 지연은 식 (8)과 같이 PEC간의 Δv 차이인 Δv_d 를 발생시킨다. 여기서, i, j 는 DC MG를 구성하는 i 번째, j 번째 PEC를 나타낸다.

TABLE I
SYSTEM PARAMETERS

Symbol	Quantity	Values
R_1	Line resistance	0.1 [Ω]
R_2	Line resistance	0.1 [Ω]
R_3	Line resistance	0.1 [Ω]
V_{nom}	Nominal Voltage	120 [V]
V_{max}	Maximum Voltage	126 [V]
V_{min}	Minimum Voltage	114 [V]
Δv_{max}	Maximum voltage variation	6 [V]
Δv_{min}	Minimum voltage variation	- 6 [V]
Δv_{b1}	Reference point 1 for OB	3.6 [V]
Δv_{b2}	Reference point 2 for OB	5.4 [V]
P_{PEC1}	Rated capacity of PEC 1	1.5 [kW]
P_{PEC2}	Rated capacity of PEC 2	1.5 [kW]
P_{load}	Rated capacity of load	3 [kW]
P_{PV}	Rated capacity of PV	3 [kW]

$$V_{o,avg} = \frac{1}{N} \left(V_{o,i} + G_{delay} \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^N V_{o,j} \right) \quad (6)$$

$$G_{delay} = \frac{1}{1 + \tau s} \quad (7)$$

$$\Delta v_d = \Delta v_i - \Delta v_j \quad (8)$$

그림 5는 다른 통신 지연에 따른 Δv_d 의 PSCAD/EMTDC 시뮬레이션 결과를 보여준다. 그림 5에서 볼 수 있듯, 통신 지연이 증가함에 따라 Δv_d 가 증가한다. 즉, 통신 지연이 큰 시스템의 경우, VS기법은 Δv_d 를 발생시키며, 이는 추가적인 순환전류를 야기한다. 또한, 제한한 제어 기법을 적용하는 경우, 각각의 PEC는 Δv 에 의해 동작 밴드를 판단한다. 따라서, PEC의 Δv 간 차이인 Δv_d 가 큰 경우 PEC는 서로 다른 밴드에서 동작할 가능성이 있다. 즉, 적절한 밴드 변동을 발생시키지 않기 때문에 에너지 관리에 어려움이 생기게 된다. 이에 따라, 통신 지연을 최소화 할 수 있도록 통신 프로토콜의 최적화가 필요하다.

4. 시뮬레이션 검증

제한한 기법의 유효성을 검증하기 위해 PSCAD/EMTDC 시뮬레이션을 수행하였다. 그림 6은 DC MG의 구조를 보여준다. 2개의 PEC와 1개의 PV, 1개의 부하로 구성되어있다. DC MG의 시스템 파라미터와 각 PEC의 용량 및 동작 밴드의 구분점은 표 I에 나타내었다. 여기서 기기 간 통신의 통신 지연은 10msec이다. 그림 7은 PEC 1, 2의 동작 밴드별 드롭 계인과 기준 전압을 보여주며 이의 값은 표 II에 나타내었다. 제한한 기법을 통해 PEC는 총 6개의 동작 밴드를 판단하게 되며, 각각 동작 밴드별 설계된 드롭 계인과 기준 전압을 적용함으로써 DC MG를 운영하게 된다.

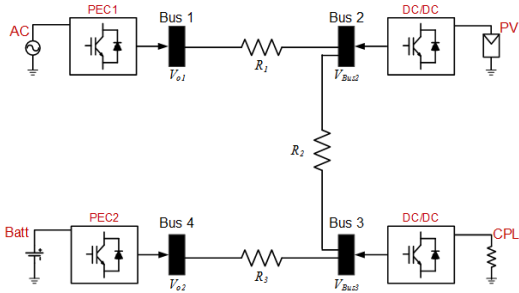


Fig. 6. Configuration of DC MG.

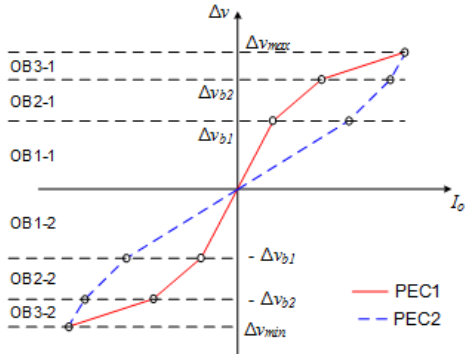


Fig. 7. Operating band and droop gain.

TABLE II
CONTROL PARAMETERS

Droop gain and nominal voltage of PEC 1			
Symbol	Values	Symbol	Values
$V_{nom1,1-1}$	120 [V]	$V_{nom1,1-2}$	120 [V]
$V_{nom1,2-1}$	117.6 [V]	$V_{nom1,2-2}$	122.4 [V]
$V_{nom1,3-1}$	115.2 [V]	$V_{nom1,3-2}$	124.8 [V]
$R_{D1,1-1}$	1.4 [Ω]	$R_{D1,1-2}$	1.48 [Ω]
$R_{D1,2-1}$	0.45 [Ω]	$R_{D1,2-2}$	0.51 [Ω]
$R_{D1,3-1}$	0.9 [Ω]	$R_{D1,3-2}$	0.1 [Ω]
Droop gain and nominal voltage of PEC 2			
Symbol	Values	Symbol	Values
$V_{nom2,1-1}$	120 [V]	$V_{nom2,1-2}$	120 [V]
$V_{nom2,2-1}$	121.2 [V]	$V_{nom2,2-2}$	117.7 [V]
$V_{nom2,3-1}$	124.9 [V]	$V_{nom2,3-2}$	116.8 [V]
$R_{D2,1-1}$	0.4 [Ω]	$R_{D2,1-2}$	0.4 [Ω]
$R_{D2,2-1}$	0.6 [Ω]	$R_{D2,2-2}$	0.7 [Ω]
$R_{D2,3-1}$	0.8 [Ω]	$R_{D2,3-2}$	0.61 [Ω]

그림 8은 부하 변동에 따른 시뮬레이션 결과를 보여 준다. 그림에서 볼 수 있듯 0.05초에 부하가 1kW를 소모한다. DC MG의 전압은 부하의 전력 소모에 의해 전압 강하가 야기되고 이에 따라 PEC 1, 2의 전압 변동 보상항 Δv_1 , Δv_2 가 양의 값으로 증가한다. Δv_1 , Δv_2 이 Δv_{bi} 보다 작기 때문에 OB1-1으로 동작한다. 이에 따라 PEC 1, 2의 드롭 계인과 기준 전압은 표 2의 OB1-1에 해당되는 값으로 설정되어 출력이 결정된다. OB1-1에서 PEC 1, 2의 출력은 각각 0.25kW, 0.76kW이다.

0.5초에 부하는 약 1.8kW로 증가하게 되며 이에 따라 Δv_1 , Δv_2 이 증가하여 OB2-1으로 동작한다. 동작 밴드가

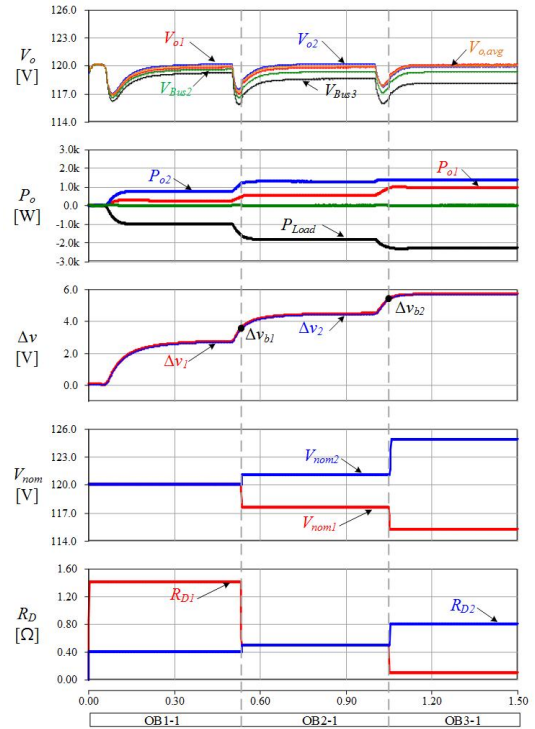


Fig. 8. Simulation results of the proposed method when load is increased.

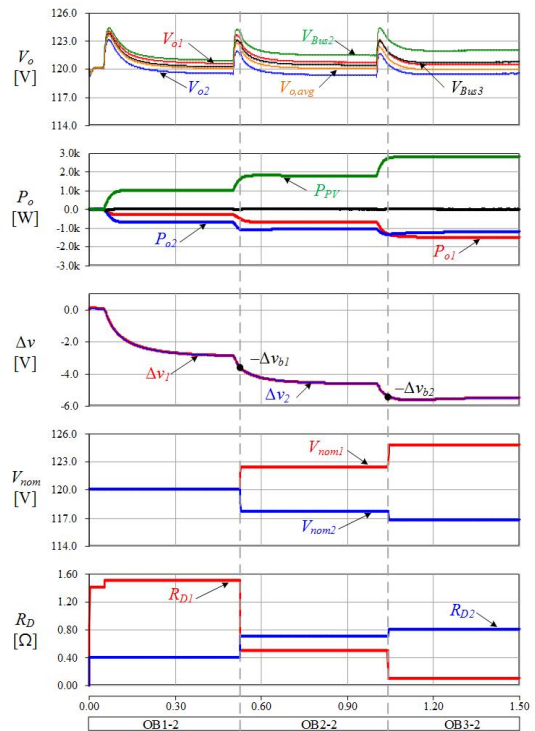


Fig. 9. Simulation results of the proposed method when RES production is increased.

OB1-1에서 OB2-1으로 변동함에 따라 PEC 1, 2의 기준 전압, 드롭 계인이 표 2의 OB2-1에 해당되는 값으로 변경된다. PEC 2의 경우 드롭 계인이 증가하였기 때문에 출력 변동의 상승폭이 작다. 반대로 PEC 1의 경우 드롭



Fig. 10. Lab-scale DC MG.

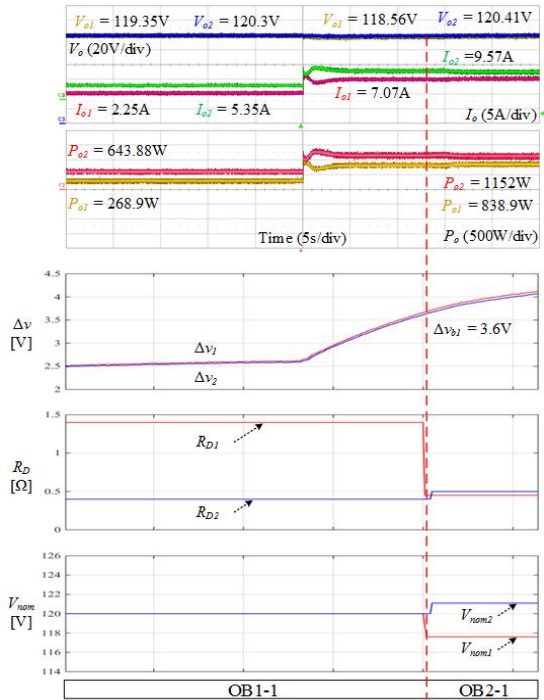


Fig. 11. Experimental results of load variation. (operation band transit OBI-1 to OB2-1)

게인이 감소하였기 때문에 출력 변동의 상승폭이 크다. OB2-1에서 PEC 1, 2의 출력은 각각 0.55kW, 1.27kW이다. 1초에 부하는 약 2.3kW로 증가하게 되며 이에 따라 동작밴드가 OB3-1로 변동된다. 앞선 동작 밴드 변동과 마찬가지로, PEC 1, 2의 기준 전압, 드롭 게인은 표 1의 OB3-1의 값으로 변경된다. PEC 1, 2의 출력은 각각 0.96kW, 1.38kW이다. 부하의 크기에 따라 전압 변동 보상항의 값이 변동하게 되고 미리 정의된 밴드별 드롭 게인에 의해 출력 스케줄링을 수행하게 된다. 또한, 모든 구간에서 DC MG의 전압은 표 1의 V_{max} , V_{min} 이내로 유지되는 것을 확인할 수 있다.

그림 9는 PV의 발전량 변동에 따른 시뮬레이션 결과를 보여준다. 그림에서 볼 수 있듯, 0.05초, 0.5초, 1초에 PV의 출력이 각각 1kW, 1.8kW, 2.7kW로 변동한다. PEC 1, 2의 전압 변동 보상항 Δv_1 , Δv_2 는 DC MG의 전압 유지를 위해 음의 값으로 증가한다. 이 값들은 표 1

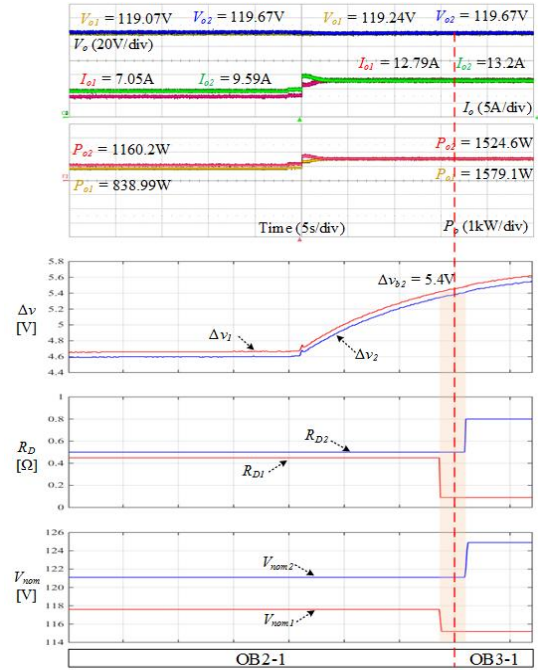


Fig. 12. Experimental results of load variation. (operation band transit OB2-1 to OB3-1)

의 동작 밴드 기준점과 비교되어 동작 밴드를 구분한다. PEC는 미리 설계된 기준 전압과 드롭 게인으로 변경하여 출력 스케줄링을 수행하게 된다. 부하 변동 상황과 마찬가지로 모든 구간에서 DC MG의 전압은 V_{max} , V_{min} 이내로 유지된다.

5. 실험 검증

그림 10은 제안한 기법의 실험 검증을 위한 lab-scale DC MG를 보여준다. 시뮬레이션에서 수행했던 부하 변동 상황을 모의하였다. 시뮬레이션과 동일하게 DC MG의 시스템 파라미터와 정격 용량 및 PEC의 드롭 게인과 기준전압은 표 I, 표 II의 값을 사용하였다. 여기서 RS-485를 통해 기기 간 통신을 수행하며, 통신 지연은 약 126msec이다.

그림 11은 부하 변동 시 OBI-1에서 OB2-1로의 동작 밴드 변동 결과를 보여준다. OBI-1에서 부하는 약 865W를 소모한다. 부하가 1.865kW로 증가하는 경우, DC MG의 전압 유지를 위해 PEC 1, 2의 Δv_1 , Δv_2 가 증가하게 된다. Δv_1 , Δv_2 이 Δv_{b1} 보다 큰 경우 동작 밴드는 OB2-1로 변동되어 출력 스케줄링을 수행한다. 여기서, PEC 1, 2의 출력은 각각 0.83kW, 1.15kW이다.

그림 12는 부하 변동 시 OB2-1에서 OB3-1로의 동작 밴드 변동 결과를 보여준다. 부하가 약 2.9kW로 증가하는 경우 PEC 1, 2의 Δv_1 , Δv_2 가 증가하게 된다. Δv_1 , Δv_2 이 Δv_{b2} 보다 큰 경우 동작 밴드는 OB3-1로 변동되어 출력 스케줄링을 수행한다. 여기서, PEC 1, 2의 출력은 각각 1.58kW, 1.52kW이다.

제안한 기법을 통해 부하에 따라 PEC의 전압 변동 보상항이 계산되고 이를 통해 동작 밴드를 판단한다. 미리 정의된 밴드별 드롭 계인과 기준전압에 의해 출력 스케줄링을 수행하게 된다. 또한, 모든 구간에서 출력 전압은 표 1의 V_{max} , V_{min} 이내로 유지되는 것을 확인할 수 있다. 하지만 통신 지연에 의해 PEC 1, 2의 Δv_1 , Δv_2 에 차이가 발생하게 되고 동작 밴드의 변동에 약간의 시간 차이가 발생함을 확인할 수 있다.

6. 결 론

기존의 드롭 제어는 드롭 계인에 의해 전압 변동을 발생시키고, 오직 정격 용량에 비례하는 부하분담을 수행함으로써 DC MG의 적절한 에너지 관리를 수행하지 못하는 단점이 있다. 이와 같은 문제를 해결하기 위해 본 논문에서는 전압 변동 보상항을 동작 밴드를 정의하는 지표로 정의함으로써 DC MG의 전압 변동이 최소화됨과 동시에 에너지 관리가 가능한 제어 기법에 관한 연구를 진행하였다.

제안한 기법에서 전력변환장치는 LBC를 통해 평균 전압을 계산하고 이를 토대로 전압 변동 보상항을 계산한다. 전압 변동 보상항에 의해 출력 전압은 드롭 제어의 전압 변동을 최소화 하게 된다. 또한 전압 변동 보상항의 크기로 부터 컨버터의 동작 밴드를 판단하게 된다. 동작 밴드별 컨버터의 기준 전압과 드롭 계인을 미리 설정함으로써, 각 동작 밴드에서의 출력 스케줄링을 결정할 수 있다. 하지만 전압 변동 보상항은 LBC를 통해 계산되기 때문에 LBC의 통신 지연은 컨버터간 전압 보상항의 차이를 발생시키는 원인이 된다. 시뮬레이션을 통해 발생 정도를 파악하였으며 이의 최소화를 위해 통신 프로토콜의 최적화가 필요함을 확인하였다. 제안한 기법의 유효성을 검증하기 위해 PSCAD/EMTDC 시뮬레이션 및 실험 모델을 구축하였으며 그 성능을 확인하였다.

본 연구는 “저압 직류 배전망 독립성 실증 연구”라는 프로젝트 하에 한국전력공사 전력연구원의 지원을 받아 수행된 과제임.

References

- [1] B. S. Ko, G. Y. Lee, S. I. Kim, R. Y. Kim, J. T. Cho, and J. Y. Kim. “A positioning method of distributed power system by considering characteristics of droop control in a DC microgrid,” *Journal of Electrical Engineering & Technology*, Vol. 13, No. 2, pp. 620–630, Mar. 2018.
- [2] T. Dragičević, X. Lu, J. C. Vasquez, and J. M. Guerrero, “DC microgrids—Part I: A review of control strategies

and stabilization techniques,” *IEEE Transactions on Power Electronics*, Vol. 31, No. 7, pp. 4876–4891, Jul. 2016.

- [3] Y. Ito, Y. Zhongqing, and H. Akagi, “DC microgrid based distribution power generation system,” in *The 4th International Power Electronics and Motion Control Conference*, 2004, Vol. 3, pp. 1740–1745, 2004.
- [4] Y. Gu, X. Xiang, W. Li, and X. He, “Mode-adaptive decentralized control for renewable DC microgrid with enhanced reliability and flexibility,” *IEEE Transactions on Power Electronics*, Vol. 29, pp. 5072–5080, 2014.
- [5] Y. Gu, W. Li, and X. He, “Frequency-coordinating virtual impedance for autonomous power management of DC microgrid,” *IEEE Transactions on Power Electronics*, Vol. 30, No. 4, pp. 2328–2337, Apr. 2015.
- [6] S. Anand, B. G. Fernandes, and J. Guerrero, “Distributed control to ensure proportional load sharing and improve voltage regulation in low-voltage DC microgrids,” *IEEE Transactions on Power Electronics*, Vol. 28, No. 4, pp. 1900–1913, Apr. 2013.
- [7] G. Y. Lee, B. S. Ko, J. Cho, and R. Y. Kim, “A distributed control method based on a voltage sensitivity matrix in DC microgrids with low-speed communication,” *IEEE Transactions on Smart Grid*, May 2018.
- [8] X. Lu, J. M. Guerrero, K. Sun, and J. C. Vasquez, “An improved droop control method for DC microgrids based on low bandwidth communication with DC bus voltage restoration and enhanced current sharing accuracy,” *IEEE Transactions on Power Electronics*, Vol. 29, No. 4, pp. 1800–1812, Apr. 2014.
- [9] P. Wang, X. Lu, X. Yang, W. Wang, and D. Xu, “An improved distributed secondary control method for DC microgrids with enhanced dynamic current sharing performance,” *IEEE Transactions on Power Electronics*, Vol. 31, No. 9, pp. 6658–6673, Sep. 2016.



고병선(高秉善)

1990년 6월 18일생. 2013년 한양대 전자정보시스템공학과 졸업. 2013년~현재 동 대학원 전기공학과 석박통합과정.



이기영(李基煥)

1987년 12월 28일생. 2013년 한양대 전기공학과 졸업. 2013년~현재 동 대학원 전기공학과 석박통합과정.



김석웅(金錫雄)

1986년 3월 19일생. 2012년 충북대 전기공학과 졸업. 2016년 한양대 전기공학과 졸업(석사). 2016년~현재 한국전력공사 기초전력연구센터 연구원.



김래영(金來瑛)

1974년 6월 6일생. 1997년 한양대 전기공학과 졸업. 1999년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 2009년 미국 버지니아 공대(Virginia Tech) 대학원 전기공학과 졸업(공학박). 1999년~2004년 효성 중공업연구소 선임연구원. 2009년~2010년 미국 National Semiconductor Senior Researcher. 2016년~2017년 미국 Virginia Tech CPES 방문교수. 2010년~현재 한양대 전기생체공학부 교수. 당 학회 재무이사.