

직류 마이크로그리드의 전력 공유 정확도 및 전압 제어 성능 향상을 위한 전압 민감도 행렬 기반의 분산 제어 방법

이기영¹, 고병선¹, 이재석¹, 김래영[†]

A Distributed Control Method based on Voltage Sensitivity Matrix in DC Microgrids for Improvement of Power Sharing Accuracy and Voltage Regulation Performance

Gi-Young Lee¹, Byoung-Sun Ko¹, Jae-Suk Lee¹, and Rae-Young Kim[†]

Abstract

A distributed control method is proposed to improve the power sharing performance of bidirectional distributed generators and the voltage regulation performance of a DC bus in a DC microgrid. Voltage sensitivity analysis based on power flow analysis is conducted to analyze the structural characteristics of a DC microgrid. A distributed control method using a voltage sensitivity matrix is proposed on the basis of this analysis. The proposed method uses information received through the communication system and performs the droop gain variation method and voltage shift method without additional PI controllers. This approach achieves improved power sharing and voltage regulation performance without output transient states. The proposed method is implemented through a laboratory-scaled experimental system consisting of two bidirectional distributed generators, namely, a load and a non-dispatchable distributed generator in a four-bus ring-type model. The experimental results show improved power sharing accuracy and voltage regulation performance.

Key words: DC microgrids, Distributed control method, Distributed generator, Voltage sensitivity matrix

1. 서 론

전력전자 기술의 발달과 상용화에 따라 신재생 에너지를 통한 전력 발전량이 매년 증가하고 있다. 그 결과 분산형 전원(Distributed generator, 이하 DG)들을 통해 효과적으로 전력을 공급하기 위해 마이크로그리드(Microgrid, 이하 MG) 개념이 제안되었다. DC MG는 DC 버스 선로를 통해 전력을 전달함으로써, PV나 배터리 같은 DC 전원과 DC 부하들의 연계 효율을 극대화한다^[3].

DC 버스의 전압을 안정화하며 균형 잡힌 전력 공급을 위해 다양한 제어 방법이 개발되어 왔으며, 이러한 제어 방법은 중앙 제어 방법, 비중앙 제어 방법, 그리고

분산 제어 방법으로 분류할 수 있다. 중앙 제어 방법은 에너지 관리 시스템이 DC 버스 선로에 연계된 DG와 부하 등의 구성 요소들의 입출력 상태를 고속 통신 시스템을 통해 모니터링 하며, 수집한 정보를 기반으로 구성 요소들의 운전 상태를 결정한다. 그러나 이 방법은 시스템 구성이 마스터-슬레이브(Master-slave) 이기 때문에 통신 시스템 의존도가 크고, 추가 구성 요소의 플러그 앤 플레이(Plug & play)가 어렵다^[4].

이에 반해 비중앙 제어 방법은 DG들이 드롭 제어를 통해 자율적으로 전력 공유를 수행한다^{[5],[6]}. 이 방법은 지역 정보만으로 제어를 수행하기 때문에 통신 시스템이 필요 없고, 플러그 앤 플레이가 용이하다. 하지만 부하 전력량에 따라 DC 버스 전압이 변동하며, 선로 저항에 의해 드롭 제어 성능이 저하되는 단점을 지닌다.

분산 제어 방법은 중앙 제어 방법과 비중앙 제어 방법의 절충안으로써 저속 통신 시스템을 통해 구성 요소 간 송수신한 정보를 이용해 제어를 수행한다. 분산 제어기는 소위 2차 제어기라고 불리며, 1차 제어기인 드롭 제어기에 추가적인 제어 지령을 전달하고, 이는 전압 이

Paper number: TKPE-2018-23-5-7

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

[†] Corresponding author: rykim@hanyang.ac.kr,
Dept. of Electrical Eng., HYPEC-EECS lab., Hanyang Univ.
Tel: +82-2-2220-2897 Fax: +82-2-2220-0570

¹ Dept. of Electrical Eng., HYPEC-EECS lab., Hanyang Univ.
Manuscript received Jul. 12, 2018; revised Aug. 6, 2018;
accepted Aug. 27, 2018

동 방법(Voltage shifting method, 이하 VSM)과 드롭 게인 가변 방법(Droop gain variation method, 이하 DVM)으로 분류한다. VSM은 드롭 제어기에 의해 발생하는 전압 변동을 보상함으로써 DC 버스의 전압 변동을 최소화 한다^{[7],[8]}. DVM은 드롭 게인을 가변 시킴으로써 DG들의 전력 공유 성능이 향상된다^{[9],[10]}.

기존에 제안된 분산 제어 방법들은 VSM과 DVM을 구현하기 위해 부가의 PI 제어기를 추가하였다. 하지만 추가 제어기를 사용할 경우, 적절한 게인 설계의 어려움이 존재한다^{[7]-[10]}. 또한 분산 제어기의 성능이 통신 속도에 영향을 받게 되며, 최악의 경우 제어기 출력이 진동하거나 발산하는 현상이 나타난다^[8].

본 논문은 DC MG의 구조적 특징을 분석하고^{[11],[12]}, 이를 이용한 분산 제어 방법을 제안한다. 전압 민감도 행렬로써 표현되는 구조적 특징을 분산 제어기에 적용하여, 통신 속도와 무관하게 정확한 전력 공유 및 전압 제어 성능을 달성한다. 4-버스 환형 선로로 구성된 실험 환경에서 다양한 부하 및 발전 상황에 대한 결과를 통해 제안하는 방법의 타당성을 검증한다.

2. 분산 제어 방법

분산 제어 방법은 양방향 분산형 전원(Bidirectional DG, 이하 BDG)간의 정확한 전력 공유와 버스 전압 변동 최소화를 위해 사용한다. BDG는 그림 1에 나타낸 바와 같이 전원(Source), 전력 변환을 위한 PCS(Power converter system), 내부 제어기(Inner controller) 및 분산 제어기(Distributed controller)로 구성된다. 내부 제어기는 드롭 제어기, 전압 제어기, 전류 제어기, 제어기 출력을 스위칭 신호로 변환하는 PWM(Pulse width modulation)을 포함한다. 분산 제어기는 통신 정보를 이용해 드롭 제어기의 제어 지령 및 변수를 변경시키며, VSM과 DVM으로 분류할 수 있다.

2.1 Voltage shifting method

드롭 제어기는 BDG의 출력 전류가 증가함에 따라 출력 전압 지령을 감소시키는 특징을 지니며, 이로 인해 전압 변동이 불가피하게 발생한다. 이를 보상하기 위해 VSM이 제안되었으며, 제어 블록도를 그림 1(a)에 나타내었다^[8]. VSM에 의해 산정되는 n 번째 BDG의 전압 이동량 Δv_n 은 식 (1)과 같이 표현되며, 여기서 V_{nom} , $i_{o,n}$, \bar{v}_o 및 \bar{i}_o 은 각각 공칭 전압, 출력 전류, 평균 출력 전압 및 평균 출력 전류이고, k_{pv} , k_{iv} , k_{pi} 및 k_{ii} 는 VSM에 포함되어 있는 PI 제어기들의 게인이다.

$$\Delta v_n = \left(k_{pv} + \frac{k_{iv}}{s} \right) (V_{nom} - \bar{v}_o) - \left(k_{pi} + \frac{k_{ii}}{s} \right) (i_{o,n} - \bar{i}_o) \quad (1)$$

$$v_{o,n}^* = V_{nom} - R_{d,n} \cdot i_{o,n} + \Delta v_n \quad (2)$$

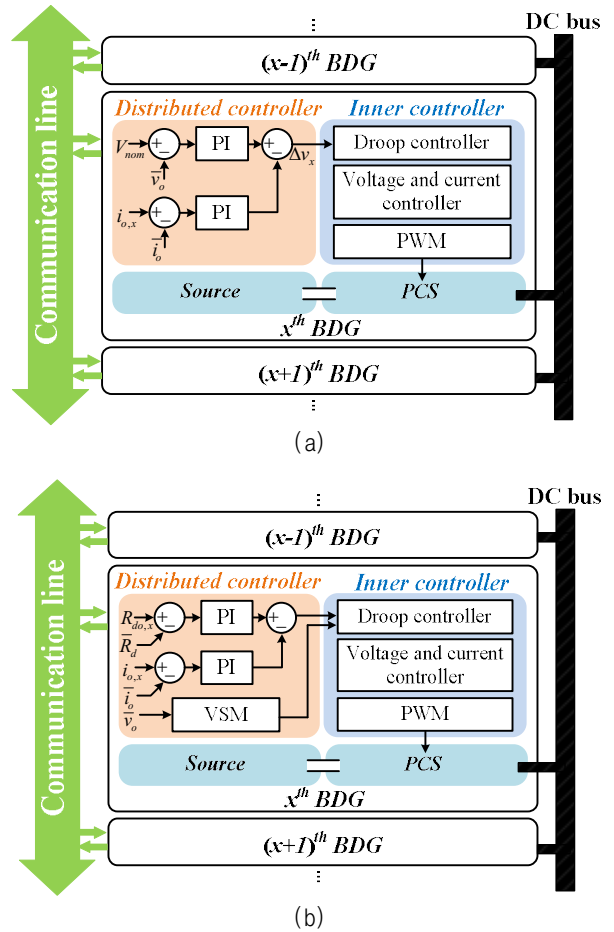


Fig. 1. Block diagram of distributed control method: (a) VSM, (b) DVM.

Δv_n 은 식 (2)와 같이 드롭 제어기에 더해지며, 여기서 $v_{o,n}^*$ 및 $R_{d,n}$ 은 전압 제어 지령 및 드롭 게인이다. $i_{o,n}$ 에 의해 변동하는 전압 지령 성분은 Δv_n 을 통해 보상됨으로써 최종 $v_{o,n}^*$ 값이 이동하게 되며, 이는 n 번째 BDG의 출력전압 $v_{o,n}$ 과 V_{nom} 의 차이가 최소화됨을 의미한다. 이를 통해 전압 제어 성능이 향상된다.

2.2 Droop gain variation method

드롭 게인은 선로 저항에 영향을 받으며, 이로 인해 설계된 대로 전력 공유가 수행되지 않는다. 이를 보상하기 위해 DVM이 제안되었으며, 제어 블록도를 그림 1(b)에 나타내었다^[10]. DVM에 의해 변하는 $R_{d,n}$ 은

$$R_{d,n} = R_{do,n} + \left(k_{pr} + \frac{k_{ir}}{s} \right) (R_{do,n} - \bar{R}_d) - \left(k_{pi} + \frac{k_{ii}}{s} \right) (i_{o,n} - \bar{i}_o) \quad (3)$$

와 같이 표현되며, 여기서 $R_{do,n}$ 및 \bar{R}_d 는 n 번째 BDG의 기존 드롭 게인 및 BDG들의 평균 드롭 게인을 의미하고,

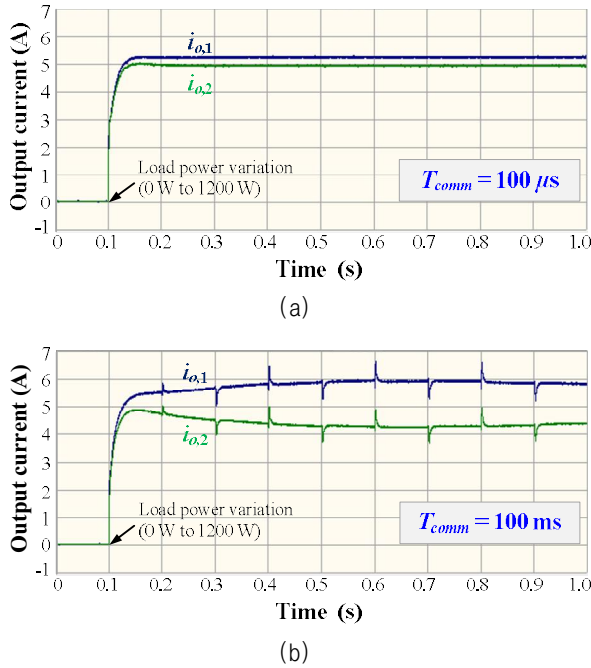


Fig. 2. BDGs output current waveform according to the communication speed. (a) $T_{comm} = 100 \mu s$. (b) $T_{comm} = 100 ms$.

k_{pr} , k_{ir} 은 DVM에 포함되어 있는 PI 제어기들의 게인이자. DVM에 의해 변경된 $R_{d,n}$ 은 식 (2)의 드롭 제어기에 반영되며, 이를 통해 전력 공유 성능이 향상된다.

3. 기존 분산 제어 방법의 단점

기존에 제안된 분산 제어 방법들은 통신 시스템을 통해 송수신한 정보를 추가 제어기의 입력 변수로 사용하여 전압 이동 및 드롭 게인 가변을 수행한다^{[7]-[10]}. 하지만 여러 개의 추가 제어기를 사용할 경우, 제어기들의 적절한 게인 설계가 어렵다. 제어기들의 게인 값에 따라 추가 제어기 출력의 정상 상태 값과 과도상태 응답에 영향을 미치므로 적합한 값을 선정해야 하나, 이에 대한 기존의 설계 방법은 시행착오에 의존하고 있다.

또한 안정성 및 속응성이 통신 속도에 의해 영향을 받는다. 그림 2에 나타난 바와 같이 통신 속도가 느려질수록 추가 제어기에 의해 정상 상태 값의 차이가 발생하며, 최악의 경우엔 출력이 발산하거나 진동하는 현상이 발생한다^[8].

4. 제안하는 분산 제어 방법

본 논문에서는 앞서 언급한 기존 분산 제어 방법의 단점을 극복하기 위해 부가의 제어기를 사용하지 않으며, 통신 속도에 영향을 받지 않는 분산 제어기를 제안한다. 선로 구성을 반영한 전압 민감도 해석을 통해 DC MG의 전체 시스템 특성을 분석하고 이를 기반으로 드롭 게인 가변 기법을 개발한다. 또한 부하 및 급전불가능

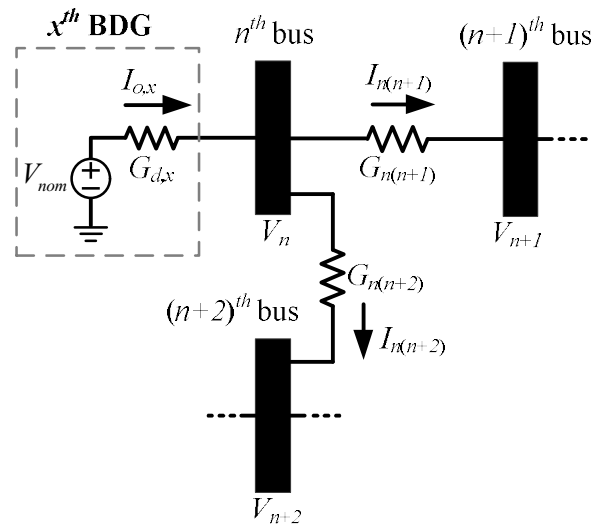


Fig. 3. Bus configuration.

분산형 전원(Non-dispatchable DG, 이하 NDG)의 출력 전압 정보를 이용해 전압 보상을 수행한다.

4.1 전압 민감도 분석

DC MG 전체 망의 특성을 분석하기 위해 선로 구성 및 BDG의 드롭 게인을 고려한 전압 민감도 해석을 수행한다^{[11],[12]}. 그림 3은 n 번째 버스에 BDG가 연결되어 있고, 인접한 2개의 버스가 선로를 통해 이어져 있는 구조를 나타내며, 여기서 V_n , $I_{n(n+1)}$ 및 $G_{n(n+1)}$ 은 각각 n 번째 버스 전압, 선로 전류 및 선로 어드미턴스이다. $I_{o,n}$ 은 n 번째 BDG의 출력 전류이고, $G_{d,n}$ 은 식 (4)와 같이 드롭 게인의 역수이다.

$$G_{d,n} = \frac{1}{R_{d,n}} \quad (4)$$

드롭 제어의 특성을 포함한 n 번째 버스의 전력 방정식은

$$P_n = \sum_j^N G_{nj} \cdot V_n (V_n - V_j) + G_{d,n} \cdot V_n (V_n - V_{nom}) \quad (5)$$

와 같이 일반화 할 수 있으며, 여기서 j 는 n 번째 버스에 인접한 버스를 나타내고, N 은 DC MG의 총 버스 수이다.

식 (6)-(9)는 자코비안 행렬 \mathbf{J} 에 의해 선형화된 조류 방정식을 나타내며, 여기서 $\Delta \mathbf{P}$ 와 $\Delta \mathbf{V}$ 는 전력 변동분 ΔP_n 과 전압 변동분 ΔV_n 에 대한 $N \times 1$ 행렬이다.

$$\Delta \mathbf{P} = \mathbf{J} \cdot \Delta \mathbf{V} \quad (6)$$

$$\Delta \mathbf{P} = [\Delta P_1 \quad \Delta P_2 \quad \dots \quad \Delta P_N]^T \quad (7)$$

$$\Delta \mathbf{V} = [\Delta V_1 \quad \Delta V_2 \quad \dots \quad \Delta V_N]^T \quad (8)$$

$$\mathbf{J} = \begin{bmatrix} J_{11} & J_{12} & \cdots & J_{1N} \\ J_{21} & J_{22} & \cdots & J_{2N} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ J_{M1} & J_{N2} & \cdots & J_{NN} \end{bmatrix} \quad (9)$$

\mathbf{J} 의 성분 J_{nm} 은 식 (10)과 같이 전력 방정식으로부터 버스 전압을 편미분함으로써 구할 수 있으며, 이를 식 (5)에 적용하여 식 (11)과 같이 나타낸다.

$$J_{nm} = \frac{\partial P_n}{\partial V_m} \quad (10)$$

$$J_{nm} = \begin{cases} \sum_h^N G_{nh}(2V_n - V_h) + G_{d,n}(2V_n - V_{nom}), & m = n \\ -G_{nm} \cdot V_m, & m \neq n, m \in h \\ 0, & m \neq n, m \notin h \end{cases} \quad (11)$$

DC MG 특성상 버스 전압들은 일정 범위 내에서 유지되므로, 식 (11)은 식 (12)과 같이 간소화 된다.

$$J_{nm} = \begin{cases} \sum_h^N G_{nh} + G_{d,n}, & m = n \\ -G_{nm}, & m \neq n, m \in h \\ 0, & m \neq n, m \notin h \end{cases} \quad (12)$$

전압 민감도 행렬 \mathbf{S} 는 식 (13)과 같이 \mathbf{J} 를 역행렬 취함으로써 구할 수 있으며, $\Delta \mathbf{P}$ 에 대한 선형화된 $\Delta \mathbf{V}$ 를 식 (14)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\mathbf{S} = \mathbf{J}^{-1} \quad (13)$$

$$\Delta \mathbf{V} = \mathbf{S} \cdot \Delta \mathbf{P} \quad (14)$$

4.2 제안하는 분산 제어기의 원리

제안하는 분산 제어 방법의 블록도를 그림 4에 나타내었다. 정확한 전력 공유 성능을 달성하기 위해 앞서 정의한 전압 민감도 행렬을 이용하며, 이를 통해 BDG의 드롭 계인들의 상대적 비율을 조정한다. 드롭 계인 계수 a_n 은 기존 드롭 계인 $R_{do,n}$ 에 곱해지는 값으로써 식 (15)와 같이 기준 BDG의 전압 변동분 ΔV_M 대비 n 번째 BDG의 전압 변동분 ΔV_n 의 비율로써 정의한다. 여기서 B_L 과 B_N 은 각각 부하와 NDG가 연계된 버스로 구성된 집합을 의미하며, S_{nh} 와 S_{Mh} 는 \mathbf{S} 행렬의 (n, h) 성분과 (M, h) 성분을 의미한다. ΔP_h 는 식 (16)과 같이

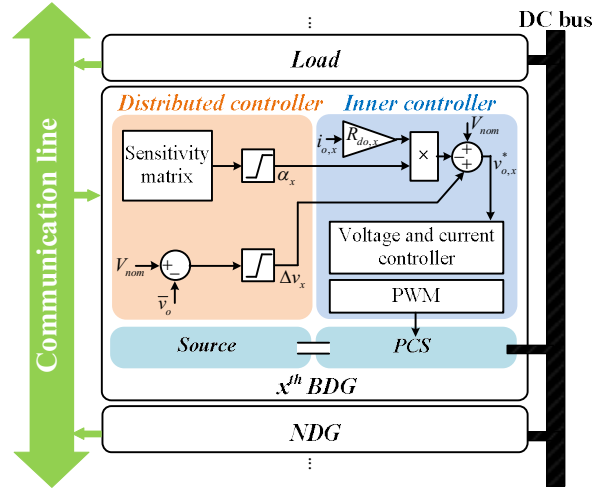


Fig. 4. Block diagram of proposed distributed control method.

h 번째 버스에 연계된 부하의 소모 전력과 NDG의 발전 전력의 차이를 의미하며, 수신한 버스 전압 v_h , 부하 전류 $i_{load,h}$ 및 NDG 전류 $i_{NDG,h}$ 정보 통해 계산된다. n 번째 BDG의 드롭 계인 $R_{d,n}$ 은 식 (17)과 같이 a_n 계수에 의해 가변하며, $R_{do,n}$ 은 식 (18)과 같이 정격 용량 $P_{rated,n}$ 에 반비례하는 값을 가진다. 여기서 ΔV 및 V_{min} 는 DC MG의 전압 변동 폭 및 최소 허용 전압을 의미한다.

$$a_n = \frac{|\Delta V_n|}{|\Delta V_M|} = \frac{\left| \sum_{h \in \{B_L \cup B_N\}} S_{nh} \cdot \Delta P_h \right|}{\left| \sum_{h \in \{B_L \cup B_N\}} S_{Mh} \cdot \Delta P_M \right|} \quad (15)$$

$$\Delta P_h = P_{load,h} - P_{NDG,h} = v_h (i_{load,h} - i_{NDG,h}) \quad (16)$$

$$R_{d,n} = a_n \cdot R_{do,n} \quad (17)$$

$$R_{do,n} = \frac{\Delta V \cdot V_{min}}{P_{rated,n}} \quad (18)$$

a_n 값이 1보다 큰 경우는 기준 BDG 대비 n 번째 BDG에 더 큰 전압 변동이 발생한 것이고, 이는 n 번째 BDG가 상대적으로 더 큰 출력을 담당함을 의미한다. 그러므로 a_n 을 $R_{d,n}$ 에 곱함으로써 n 번째 드롭 계인을 증가시키고, 이를 통해 n 번째 BDG가 상대적으로 담당하는 출력을 감소시킴으로써 전력 공유 성능을 향상한다.

드롭 제어기에 의해 변동하는 BDG의 출력 전압을 보상하기 위해 수신한 v_h 를 이용한다. DC MG의 선로 전압 강하로 인해 부하가 연결된 v_h 는 $v_{o,n}$ 보다 낮고, NDG가 연결된 v_h 는 $v_{o,n}$ 보다 높다. 그러므로 제안하는 분산 제어 방법에서는 식 (19)와 같이 V_{nom} 대비 v_h 의 편차의 평균만큼 전압 보상 Δv_n 을 수행하여 버스 전압 변동을 최소화한다.

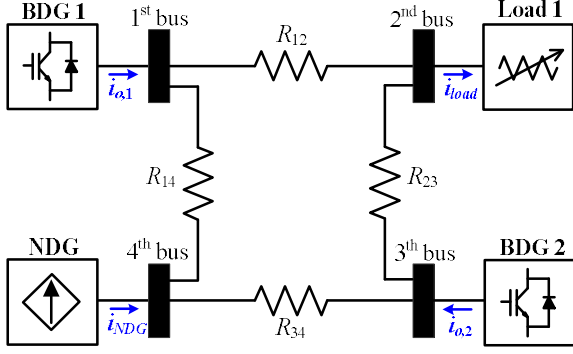


Fig. 5. Diagram of 4-bus ring type configuration.

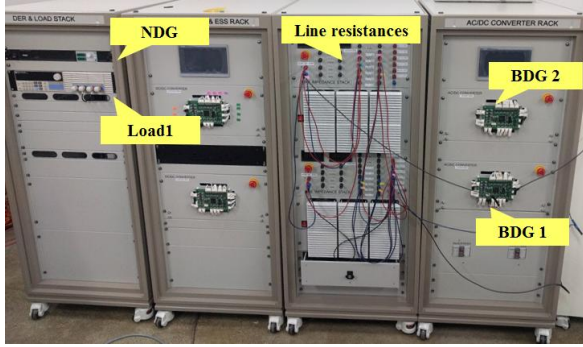


Fig. 6. Photograph of the experimental system.

 TABLE I
PARAMETERS OF EXPERIMENTAL SYSTEM

| Parameters | Symbol | Value |
|---|------------------|----------------|
| Nominal voltage | V_{nom} | 120 V |
| Voltage variation width | ΔV_{def} | 6 V |
| Rated power of BDG 1 | P_{rated1} | 1500 W |
| Rated power of BDG 2 | P_{rated2} | 1500 W |
| Original droop gain of BDG 1 | $R_{do,1}$ | 0.456 Ω |
| Original droop gain of BDG 2 | $R_{do,2}$ | 0.456 Ω |
| Maximum power of load | P_{load} | 1000 W |
| Maximum power of NDG | P_{NDG} | 1100 W |
| Line resistance between 1st and 2nd bus | R_{12} | 0.18 Ω |
| Line resistance between 2nd and 3rd bus | R_{23} | 0.3 Ω |
| Line resistance between 3rd and 4th bus | R_{34} | 0.18 Ω |
| Line resistance between 1th and 4th bus | R_{14} | 0.3 Ω |

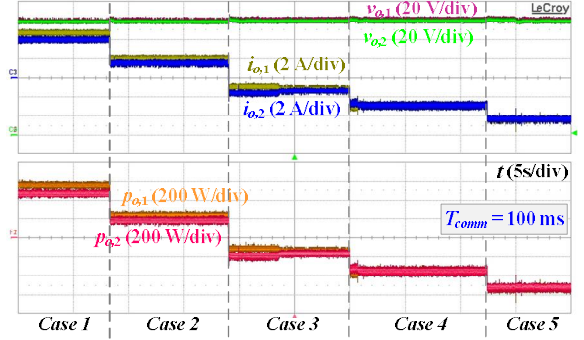
$$\Delta v_n = \frac{\sum_{h \in \{B_L \cup B_N\}} (V_{nom} - v_h)}{N_l} = V_{nom} - \Delta \bar{v}_o \quad (19)$$

$$\Delta \bar{v}_o = \frac{\sum_{h \in \{B_L \cup B_N\}} v_h}{N_l} \quad (20)$$

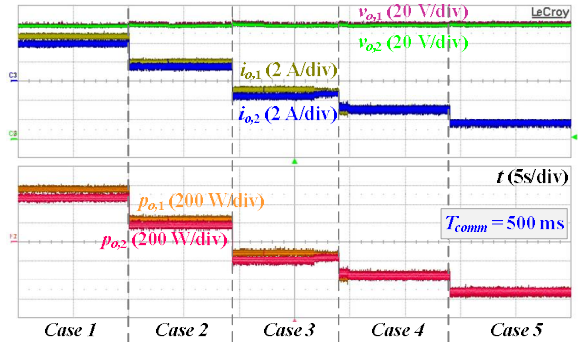
여기서 N_l 은 부하 또는 NDG가 연결된 버스의 수이고, $\Delta \bar{v}_o$ 은 식 (20)과 같이 v_h 의 평균을 의미한다.

 TABLE II
POWER CONDITIONS OF LOAD AND NDG

| Power | Case 1 | Case 2 | Case 3 | Case 4 | Case 5 |
|------------------|--------|--------|--------|--------|--------|
| Load, P_{load} | 1000 W | 400 W | 400 W | 0 W | 0 W |
| NDG, P_{NDG} | 0 W | 0 W | 700 W | 700 W | 1100 W |



(a)



(b)

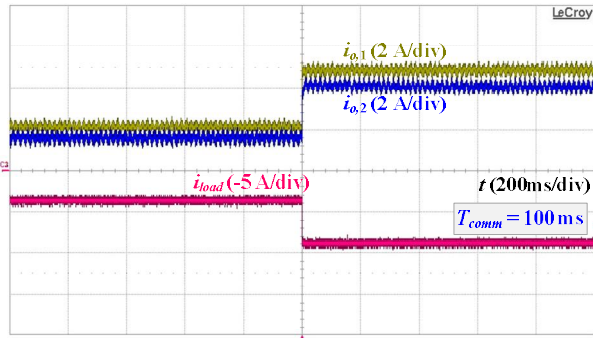
 Fig. 7. Experimental results for the five conditions shown in Table II: (a) $T_{comm} = 100$ ms, (b) $T_{comm} = 500$ ms.

 TABLE III
BUS VOLTAGE AND POWER FLOW VALUES

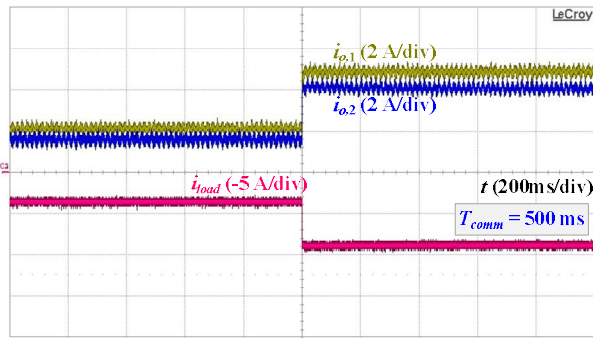
| Conditions (Table III) | Bus voltage (p.u.) | | Power (p.u.) | |
|------------------------|--------------------|-----------|--------------|-----------|
| | $v_{o,1}$ | $v_{o,2}$ | $p_{o,1}$ | $p_{o,2}$ |
| Case 1 | 0.9956 | 0.9987 | 0.3588 | 0.3294 |
| Case 2 | 0.9983 | 1.0005 | 0.1504 | 0.1389 |
| Case 3 | 1.0046 | 1.0075 | -0.0933 | -0.0827 |
| Case 4 | 1.0075 | 1.0075 | -0.2234 | -0.2151 |
| Case 5 | 1.0057 | 1.0057 | -0.3545 | -0.3317 |

5. 실험 검증

제안하는 분산 제어 방법을 검증하기 위해 BDG 2대, 부하 및 NDG로 이루어진 실험 환경이 구성되었으며, 이에 대한 상세 파라미터 값을 표 1에 정리하였다. 그림 5에 나타난 4-버스 환형 선로로 구성된 DC MG를 구현하였고, 그림 6은 실험 환경 사진이다. 구성한 실험 환경에 제안하는 분산 제어 방법을 적용하면 드롭 게인

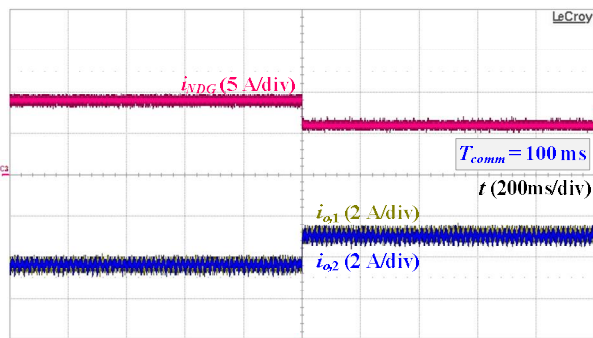


(a)

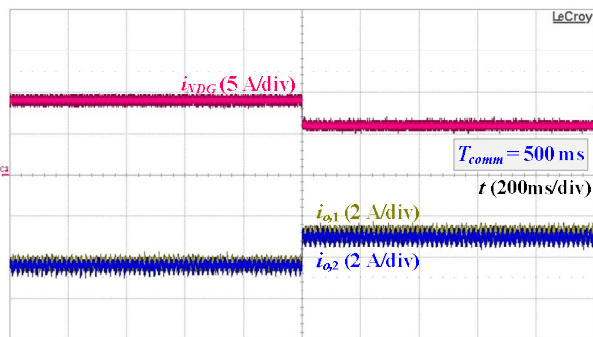


(b)

Fig. 8. Transient response of BDG's output current when load power is changed as 400W to 1000W: (a) $T_{comm} = 100$ ms, (b) $T_{comm} = 500$ ms.



(a)



(b)

Fig. 9. Transient response of BDG's output current when NDG power is changed as 1100W to 700W: (a) $T_{comm} = 100$ msec, (b) $T_{comm} = 500$ msec.

가변 항과 전압 보상 항은 식 (21)-(22)과 같이 유도되며, 전압 민감도 해석에 사용된 행렬들은 식 (23)-(24)과 같다.

$$\alpha_2 = \frac{S_{32} \cdot P_{load} + S_{34} \cdot (-P_{NDG})}{S_{12} \cdot P_{load} + S_{14} \cdot (-P_{NDG})} \quad (21)$$

$$\Delta v_1 = \Delta v_2 = V_{nom} - \frac{v_2 + v_4}{2} \quad (22)$$

$$J = \begin{bmatrix} G_{d,1} + G_{12} + G_{14} & -G_{12} & 0 & -G_{14} \\ -G_{12} & G_{12} + G_{23} & -G_{23} & 0 \\ 0 & -G_{23} & G_{d,2} + G_{23} + G_{34} & -G_{34} \\ -G_{14} & 0 & -G_{34} & G_{34} + G_{12} \end{bmatrix} \quad (23)$$

$$S = \begin{bmatrix} 0.0287 & 0.0250 & 0.0188 & 0.0225 \\ 0.0250 & 0.0358 & 0.0225 & 0.0234 \\ 0.0188 & 0.0225 & 0.0287 & 0.0250 \\ 0.0225 & 0.0234 & 0.0250 & 0.0358 \end{bmatrix} \quad (24)$$

그림 7은 표 2에 나타낸 5가지 부하 및 발전 상황에 대한 실험 파형을 보여주며, 각 상황 별로 약 10초씩 유지시켰다

각 상황 별 버스 전압 및 출력 전력의 평균값을 표 3에 나타내었다. 실험 파형에서 보이는 바와 같이 2대의 BDG가 동일한 출력 전력을 내보내거나 흡수하며, 이를 통해 오차 범위 10% 이내에서 전력 공유가 정확하게 수행됨을 확인할 수 있다. 또한 부하 및 발전 상황이 변하더라도 출력 전압이 공칭전압과 유사하게 유지되고, 이를 통해 적절한 전압 보상이 수행됨을 확인한다. 게다가 통신 속도가 100 ms에서 500 ms로 느려지더라도, 분산 제어가 성능에는 영향을 미치지 않는 것을 확인할 수 있다.

그림 8은 부하 소모 전력이 400 W 에서 1000 W로 순간적으로 증가했을 때 BDG들의 출력 전류 파형을 보여준다. 실험 파형에서 확인할 수 있듯이 통신 속도가 느려지더라도 BDG들의 출력에 그림 2(b)와 같은 과도 현상이 생기지 않음을 확인할 수 있다. 그림 9는 NDG 발전 전력이 1100 W 에서 700 W로 순간적으로 감소했을 때 BDG들의 출력 전류 파형을 보여준다. 그림 8의 결과와 마찬가지로 통신 속도가 과도 상태 응답에 영향을 주지 않는다. 이를 통해 통신 속도는 제한한 분산 제어기의 성능에 영향을 주지 않음을 검증하였다.

6. 결 론

본 논문에서는 전력 공유 및 전압 제어 성능 향상을 위한 분산 제어 방법을 제안하였다. DC 마이크로그리드의 선로 구성을 해석하기 위해 전압 민감도 행렬을 유도하였고, 이 해석을 통해 산출되는 전압 민감도 행렬을

이용하는 분산 제어를 제안하였다. 기존의 분산 제어 방법과 달리 부가의 PI 제어를 사용하지 않기 때문에 분산 제어기 성능이 통신 속도에 영향을 받지 않으며, 과도 상태 응답이 최소화된다. 제안하는 방법을 검증하기 위해 4-버스 환형 선로로 구성된 DC MG 실험 환경을 구현하였다. 제안하는 방법은 다양한 부하 상황에서 높은 전력 공유 및 전압 제어 성능을 가지며, 통신 속도가 느려지더라도 제어 성능이 저하되지 않음을 실험 결과를 통해 검증하였다.

본 연구는 산업통상자원부(MOTIE)와 한국에너지기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구 과제입니다. (No. 20168530050030)

References

[1] H. Kakigano, Y. Miura, and T. Ise, "Low-voltage bipolar-type DC microgrid for super high quality distribution," *IEEE Trans. Power Electron.*, Vol. 25, No. 12, pp. 3066-3075, Dec. 2010.

[2] R. S. Balog, W. W. Weaver, and P. T. Krein, "The load as an energy asset in a distributed DC smartgrid architecture," *IEEE Trans. Smart Grid*, Vol. 3, No. 1, pp. 253-260, Feb. 2012.

[3] T. Dragičević, X. Lu, J. C. Vasquez, and J. M. Guerrero, "DC microgrids—Part II: A review of power architectures, applications, and standardization issues," *IEEE Trans. Power Electron.*, Vol. 31, No. 5, pp. 3528-3549, May 2016.

[4] J. Xiao, P. Wang, and L. Setyawan, "Multilevel energy management system for hybridization of energy storages in DC microgrids," *IEEE Trans. Smart Grid*, Vol. 7, No. 2, pp. 847-847, Mar. 2016.

[5] Y. Ito, Y. Zhongqing, and H. Akagi, "DC microgrid based distribution power generation system," *Proc. IEEE 4th Int. Power Electron. Motion Control Conf. (IPEMC)*, Vol. 3, pp. 1740-1745, 2004.

[6] Y. Gu, X. Xin, W. Li, and X. He, "Mode-adaptive decentralized control for renewable DC microgrid with enhanced reliability and flexibility," *IEEE Trans. Power Electron.*, Vol. 29, No. 9, pp. 5072-5080, Sep. 2014.

[7] S. Anand, B. G. Fernandes, and J. M. Guerrero, "Distributed control to ensure proportional load sharing and improve voltage regulation in low voltage DC microgrids," *IEEE Trans. Power Electron.*, Vol. 28, No. 4, pp. 1900-1913, Apr. 2013.

[8] L. Xiaonan, J. M. Guerrero, S. Kai, 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 Trans. Power Electron.*, Vol. 29, No. 4, pp. 1800-1812, Apr. 2014.

[9] S. Augustine, M. K. Mishra, and N. Lakshminarasamma, "Adaptive droop control strategy for load sharing and circulating current minimization in low-voltage standalone DC microgrid," *IEEE Trans. Sustain. Energy*, Vol. 6, No. 1, pp. 132-141, Jan. 2015.

[10] P. Wang, X. Lu, X. Yang, W. Wang, and D. G. Xu, "An improved distributed secondary control method for DC microgrids with enhanced dynamic current sharing performance," *IEEE Trans. Power Electron.*, Vol. 31, No. 9, pp. 6658-6673, Sep. 2016.

[11] C. Li, S. K. Chaudhary, M. Savaghebi, J. C. Vasquez, J. M. Guerrero, "Power flow analysis for low-voltage AC and DC microgrids considering droop control and virtual impedance," *IEEE Trans. Smart Grid*, Vol. 8, No. 6, Nov. 2017.

[12] B. S. Ko, G. Y. Lee, J. Y. Kim, T. H. Kim, and R. Y. Kim, "A positioning method of distributed power system for minimum voltage variation in a DC microgrid," *Future Energy Electronics Conference and ECCE Asia (IFEEC 2017 - ECCE Asia)*, Jul. 2017.



이기영 (李基煥)

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



고병선 (高秉善)

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



이재석 (李載錫)

1989년 1월 22일. 2015년 국민대 전자공학과 졸업. 2015년~현재 한양대 전기공학과 석박통합과정.



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(공학박사). 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.