

G-parameter를 이용한 직류 마이크로그리드의 컨버터 상호 안정도 분석 및 가상 임피던스를 이용한 안정도 향상

이재석¹, 이기영¹, 김래영[†]

Stability Analysis Using G-Parameters of Converters Constituting DC Microgrid and Stability Enhancement Through Virtual Impedance

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

Abstract

DC microgrid system composed of multiple converters has a tendency to make the system unstable due to the interaction of converters. To solve this problem, in this paper, the interaction between cascaded converters with LC input filter is analyzed with impedance modeling using g-parameter. The input impedance and the output impedance of the system can be obtained through this technique. The stability of the system can be determined by applying Middlebrook's stability criterion to the impedance. Virtual impedance is added to the controller to enhance stability. The validity of the analysis is verified by the result of several simulations and experiments.

Key words: DC microgrid, Stability analysis, G-parameter, Virtual impedance

1. 서 론

화석 연료의 사용으로 대기오염 및 지구 온난화 문제가 크게 대두되어 이를 극복하기 위한 태양광 발전, 조력 발전, 풍력 발전 등 신재생 에너지 발전 사업이 점차 증가하고 있다. 특히 기존 어플리케이션을 이용하여 전기 에너지를 생산, 관리, 공급을 하는 마이크로그리드 시스템에 관한 연구가 활발히 진행되고 있다^{[1]-[3]}. 이러한 신재생 에너지 발전 사업의 증가로 많은 마이크로그리드 시스템이 계통에 연계됨에 따라 시스템의 안정성 문제가 주목 받고 있다^{[4]-[6]}.

마이크로그리드 시스템은 그림 1에서 보는 바와 같이 여러 대의 컨버터들이 Common bus에 연결되어 있는 하나의 집합체로 구성된다. 일반적으로, 마이크로그리드 시스템을 구성하는 각각의 컨버터는 단독운전시 안정적으로 동작하도록 설계된다. 하지만 두 대 이상의 컨버터

를 연계하여 통합 운전을 할 때에는 컨버터 간의 상호 작용으로 인하여 전체 시스템이 불안정해질 수 있다는 문제점이 있다.

컨버터 간의 상호 작용을 분석하기 위해 마이크로그리드 시스템을 임피던스 기반으로 모델링하는 다양한 연구들이 진행되어 왔다^{[7]-[12]}. 임피던스 모델링은 마이크로그리드 시스템을 구성하는 컨버터를 바라보는 방향에 따라 입력 임피던스와 출력 임피던스로 모델링하는 기법이다. 이 기법을 통해서 얻은 입, 출력 임피던스를 이용함으로써 마이크로그리드 시스템의 안정도 판별을 수행한다. 안정도 판별 방법은 Middlebrook's stability criterion^[13], Gain Margin Phase Margin(GMPM) stability criterion^[14], Energy Source Analysis Consortium(ESAC) stability criterion^[15]이 제안되어 왔다.

한편, 마이크로그리드 시스템이 불안정할 경우, 시스템의 안정도를 향상시키기 위해 적절한 가상 임피던스를 제어기에 추가하는 능동 감쇄 기법이 제안되었다^{[16],[17]}. [16]에서는 가상 임피던스를 출력 커패시터 및 컨버터 출력 단에 직렬로 추가함으로써 안정도를 향상시킨다. 하지만 이 방법은 입력 필터의 영향성을 고려하지 않았다. [17]에서는 입력 필터를 포함한 시스템 해석을 수행하며, 가상 임피던스를 출력 임피던스에 직렬로 추가하는 방법을 제안하였다. 하지만 이 방법의 경우

Paper number: TKPE-2018-23-5-4

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 Jun. 22, 2018; revised Jul. 18, 2018;
accepted Aug. 18, 2018

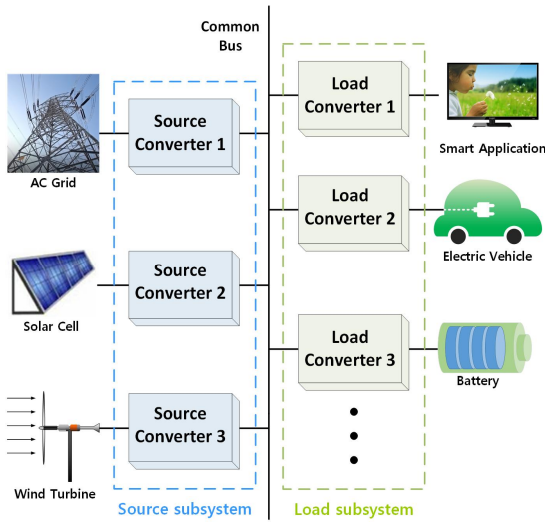


Fig. 1. Configuration of microgrid system.

Common bus를 기준으로 모델링하지 않았기 때문에 마이크로그리드 시스템에 적합하지 않다.

본 논문에서는 Common bus를 기준으로 LC 입력 필터를 포함한 g-parameter 기반의 임피던스 모델링을 수행하였고 Middlebrook's stability criterion을 이용하여 시스템의 안정도를 분석하였다. 또한, 적절한 가상 임피던스를 선정하였으며 이를 통해 능동 감쇄 기법의 적용에 따른 시스템의 안정도를 분석하였다. 분석의 타당성을 검증하기 위해 2대의 컨버터가 연계된 직류 마이크로그리드를 구성하였다. 이에 대한 시뮬레이션 결과를 제시함으로써 제한한 능동 감쇄 기법에 의해 안정화된 제어 출력을 검증한다. 또한 시뮬레이션 기반의 축소 모델과 동일한 실험 환경을 구축하며, 실험 결과를 통해 제한한 방법의 타당성을 검증한다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 2장에서는 g-parameter를 이용한 모델링 기법과 Middlebrook's stability criterion을 이용한 안정도 판별법에 대하여 설명한다. 3장에서는 Common bus를 기준으로 입력 필터를 고려한 시스템의 안정도를 분석하며, 안정도 향상 제어에 대하여 설명한다. 4장에서는 실험 결과를 통해 분석의 타당성을 검증한다.

2. G-parameter를 이용한 마이크로그리드 시스템 안정도 분석

2.1 시스템 안정도 분석을 위한 g-parameter 모델링

그림 1에서 볼 수 있듯이 여러 대의 컨버터들은 Common bus를 중심으로 연결되어 있다. Common bus에 연결된 각각의 컨버터가 동작할 때 컨버터 간의 상호작용으로 인하여 마이크로그리드 시스템의 안정도가 저하될 수 있다. 따라서 Common bus에 연결된 컨버터들의 안정도를 확보하기 위해 동작 특성을 고려한 상호 안정도 해석이 필요하다.

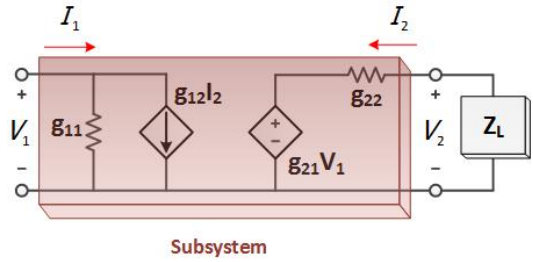


Fig. 2. Subsystem schematic using g-parameter.

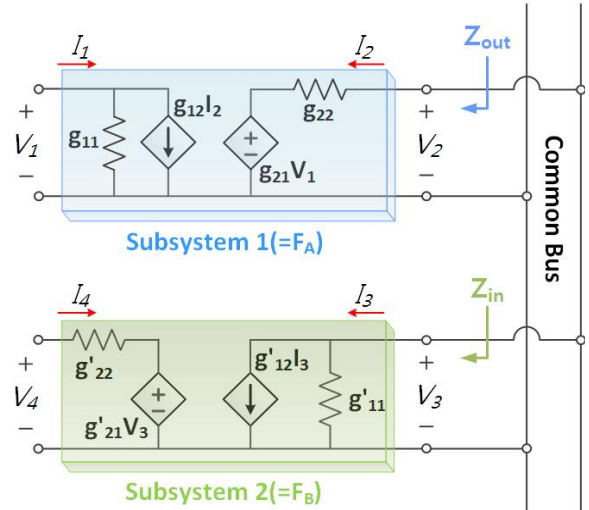


Fig. 3. Interconnected subsystem schematic using g-parameter.

그림 2는 단일 subsystem에서의 g-parameter를 고려한 등가회로이다. g_{11} 은 개방 회로 입력 어드미턴스, g_{21} 은 개방 회로 전압 전달함수, g_{12} 는 단락 회로 전류 전달함수, g_{22} 는 단락회로 출력 임피던스를 나타낸다^[16]. 그림 2에서 입, 출력 방정식을 구하면 수식 (1)과 같다.

$$\frac{V_2}{V_1} = \frac{g_{21}}{1 + \frac{g_{22}}{Z_L}} \quad (1)$$

그림 3은 g-parameter를 이용하여 상호 연결된 subsystem을 나타낸 회로도이다. 그림 3에서 볼 수 있듯이 두 개의 시스템이 연계됨에 따라 subsystem 1과 subsystem 2의 전압, 전류가 상호 간섭을 일으키는 것을 알 수 있다. 컨버터 간의 상호 간섭을 분석하기 위해 수식 (1)을 이용하여 subsystem 1과 subsystem 2의 입, 출력 방정식을 구하면 수식 (2), (3)과 같다. Subsystem 1과 Subsystem 2의 선로 임피던스는 매우 작은 값이라고 가정하면, 전체 시스템의 입, 출력 전달함수는 수식 (4)과 같이 표현할 수 있다. 수식 (4)에서 F_A 와 F_B 는 subsystem의 개방 회로 전압 전달함수이며 고정된 값이다. 그러므로 시스템 특성 방정식은 수식 (4)의 분모항과 같으며, 이를 통해 전체 시스템의 안정도를 분석할 수 있다.

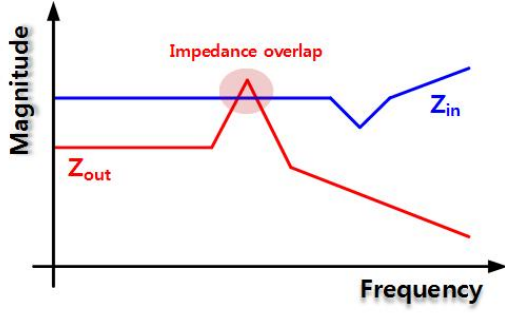


Fig. 4. Stability analysis method using middlebrook's stability criterion.

$$\frac{V_2}{V_1} = \frac{g_{21}}{1 + \frac{g_{22}}{Z_{in}}} = \frac{g_{21}}{1 + \frac{Z_{out}}{Z_{in}}} \quad (2)$$

$$\frac{V_4}{V_3} = \frac{g'_{21}}{1+0} = g'_{21} \quad (3)$$

$$\frac{V_4}{V_1} = \frac{F_A F_B}{1 + \frac{Z_{out}}{Z_{in}}} \quad (4)$$

2.2 Middlebrook's stability criterion을 이용한 안정도 판별법

본 논문에서는 시스템의 안정도를 판단하기 위해 입, 출력 임피던스를 기반으로 시스템의 안정도를 판단하는 Middlebrook's stability criterion을 이용하였다^[13]. Middlebrook's stability criterion은 수식 (5)와 같고 그림 4에 도시하였다. 이 수식은 출력 임피던스가 입력 임피던스보다 작은 값을 가지면 모든 주파수 영역에서 입, 출력 임피던스로 인한 중첩 현상이 발생하지 않는다는 것을 의미한다. 또한, Subsystem들 간의 상호 작용이 발생하지 않기 때문에 시스템의 절대 안정도를 보장할 수 있다.

$$\begin{aligned} \|Z_e\| > \|Z_{out}\| &: \text{stable} \\ \|Z_e\| < \|Z_{out}\| &: \text{unstable} \end{aligned} \quad (5)$$

3. 시스템 안정도 분석 및 안정도 항상 제어 기법

3.1 Common bus를 기준으로 LC 입력 필터를 고려한 시스템 안정도 분석

실제 직류 마이크로그리드 시스템의 경우 LC 입력 필터가 포함된다. 그러므로 Common bus를 기준으로 모델링 할 때 LC 입력 필터에 대한 고려가 필요하다. 그림 5는 LC 필터를 포함한 마이크로그리드 시스템의 안정도 분석을 위한 회로도이다. 그림에서 볼 수 있듯이 입력 임피던스(Z_{in})와 출력 임피던스(Z_{out})는 Common bus에 연결된 지점을 기준으로 정의하였다. 그림 5에서

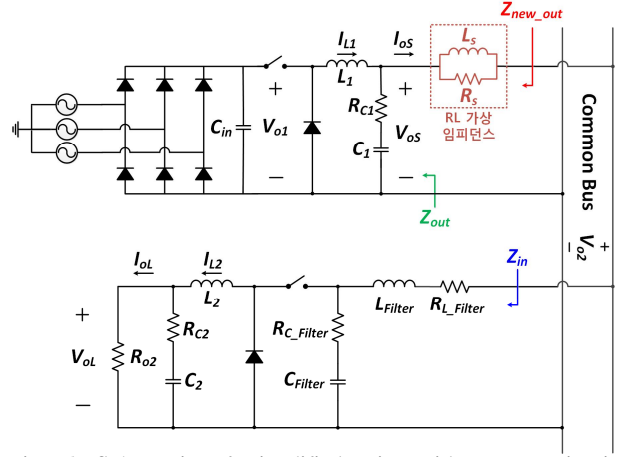


Fig. 5. Schematic of simplified microgrid system circuit with virtual impedance.

TABLE I
BUCK CONVERTER CANONICAL MODEL
PARAMETERS

$M(D)$	L_e	$e(s)$	$j(s)$
D_L	L_L	$\frac{V_{oL}}{D^2}$	$\frac{V_{oL}}{R_{oL}}$

정의된 입력 임피던스는 수식 (6)과 같이 구할 수 있다. 여기서 인덕터 전류 전달함수(G_{ig})와 입력 필터를 추가한 전달함수($G_{id_with\ filter}$)는 수식 (7), (8)에 나타내었다. 수식 (7), (8)의 값은 표 1과 수식(9), (10)을 이용하여 구할 수 있다^[18]. 출력 임피던스는 수식 (11)과 같다.

$$Z_{in} = \left(\frac{1+T}{M(D)G_{ig} - T \frac{j(s)}{e(s)}} \right), \quad T = G_{id}C_i \quad (6)$$

$$G_{ig}(s) = \frac{M(D)(1+R_{oL}C_Ls)}{L_eR_{oL}C_Ls^2 + L_e s + R_{oL}} \quad (7)$$

$$G_{id_with\ filter} = \frac{1 + \frac{Z_{out}(s)}{Z_N(s)}}{1 + \frac{Z_{out}(s)}{Z_D(s)}} (G_{id}(s)|_{Z_{out} \rightarrow 0}) \quad (8)$$

$$Z_D = \frac{1}{D_L^2} \left(sL_L + R_{oL} // \left(\frac{1}{sC_L} + R_{cL} \right) \right) \quad (9)$$

$$Z_N = -\frac{R_{oL}}{D_L^2} \quad (10)$$

$$Z_{out} = \frac{s^2L_sC_sR_{Cs} + sL_s}{s^2L_sC_s + sC_sR_{Cs} + 1} \quad (11)$$

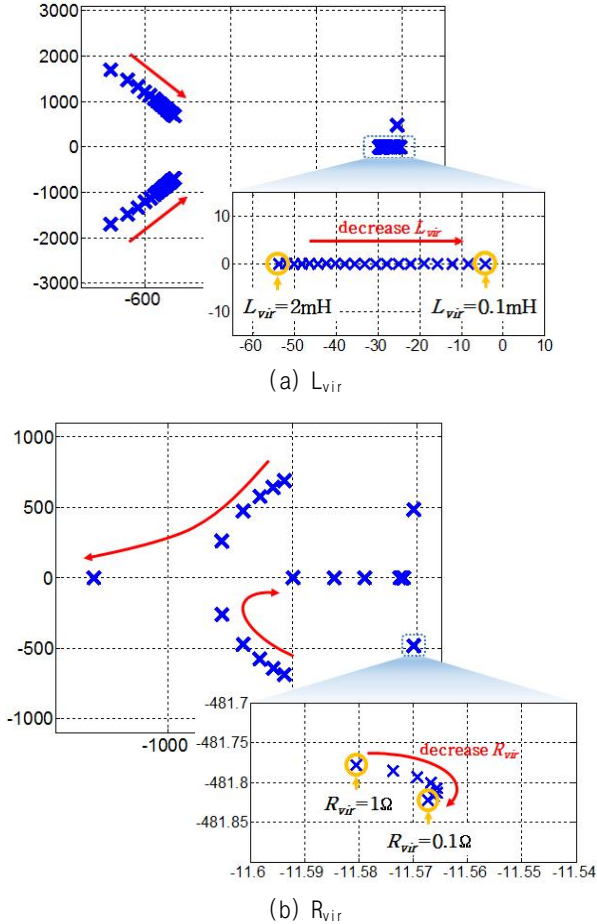


Fig. 6. Poles of virtual impedance with varying.

TABLE II
VIRTUAL IMPEDANCE PARAMETERS

L_{vir}	R_{vir}
2 [mH]	1 [ohm]

3.2 가상 임피던스를 이용한 시스템의 안정도 향상 제어

시스템의 불안정한 현상은 임피던스 중첩으로 인해 발생한다. 이러한 현상을 제거하기 위하여 그림 5에서와 같이 가상의 임피던스를 출력 임피던스에 추가하였다. 수식 (12)은 가상 임피던스에 대한 수식이다. 가상 임피던스를 추가하여 새로운 출력 임피던스를 구하면 수식 (13)와 같다.

$$Z_{vir} = \frac{1}{\frac{1}{sL_{vir}} + \frac{1}{R_{vir}}} \quad (12)$$

$$Z_{new_out} = \frac{1}{\frac{1}{Z_{out}} + \frac{1}{Z_{vir}}} \quad (13)$$

TABLE III
SYSTEM PARAMETERS OF SUBSYSTEM 1

Subsystem 1	
Rated power	2 [kW]
Input voltage(V_{o1})	513 [V]
Output voltage(V_{o2})	380 [V]
Inductance(L_1)	4.3 [mH]
Capacitance(C_1)	1000 [uF]
ESR of Capacitor(R_{C1})	0.1 [ohm]
Switching frequency	10 [kHz]

TABLE IV
SYSTEM PARAMETERS OF SUBSYSTEM 2

Subsystem 2	
Rated power	2 [kW]
Input voltage(V_{o2})	380 [V]
Output voltage(V_{oL})	190 [V]
Inductance(L_2)	1.52 [mH]
Capacitance(C_2)	330 [uF]
ESR of Capacitor(R_{C2})	0.1 [ohm]
Switching frequency	10 [kHz]

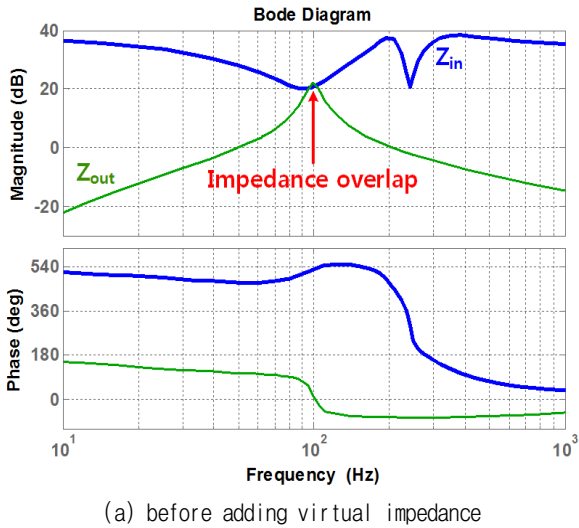
TABLE V
INPUT FILTER PARAMETERS

L_{Filter}	R_{L_Filter}	C_{Filter}	R_{C_Filter}
3.63 [mH]	0.2 [ohm]	1000 [uF]	1 [ohm]

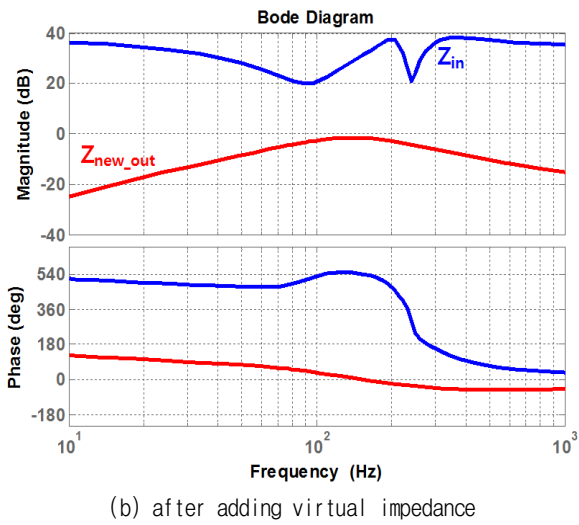
가상 임피던스 값 선정 방법은 그림 6과 같다. 가상 인덕턴스 값을 선정하기 위해 가상 저항 값을 0.5Ω으로 고정시키고 가상 인덕턴스 값을 0.1mH~2mH까지 변동시켰다. 가상 인덕턴스 값의 변동에 따른 극점의 위치는 그림 6(a)와 같다. 가상 저항 값을 선정하기 위해 그림 6(a)에서 선정한 가상 인덕턴스 값을 고정시키고 가상 저항 값을 0.1Ω~1Ω까지 변동시켰다. 가상 저항의 변동에 따른 극점의 위치를 그림 6(b)에 나타내었다. 이를 통해 표 2와 같이 적절한 가상 임피던스 값을 선정하였다.

그림 7은 표 3, 4, 5의 파라미터를 이용하여 가상 임피던스 적용 전, 후의 안정도 분석을 나타낸다. 표 3, 4는 Subsystem 1과 Subsystem 2의 파라미터이고, 표 5는 입력 필터 파라미터이다.

그림 7(a)는 가상 임피던스를 적용하기 전의 수식 (6), (11)을 이용하여 분석한 결과이다. 그림에서 볼 수 있듯이 임피던스 중첩 현상이 발생하였으며, 이는 Middlebrook's stability criterion의 수식 (5)에 부합하지 않으므로 시스템이 불안정하다는 것을 알 수 있다. 그림 7(b)는 가상 임피던스를 적용한 수식 (6), (13)을 이용하여 분석한 결과이다. 안정도 분석 결과 중첩 현상이 제거된 것을 확인하였고, 이를 통해 시스템이 안정해진다는 것을 예측할 수 있다.



(a) before adding virtual impedance



(b) after adding virtual impedance

Fig. 7. System stability analysis using bodeplot.

4. 실험

그림 8의 마이크로그리드 축소 모델을 이용하여 실험을 진행하였다. 축소 모델은 시뮬레이션 모델과 동일하게 다이오드 정류기, 입력 필터, Source, Load subsystem 각각 1대로 구성하였다. 다이오드 정류기는 세미크론사의 SKD82를 사용하였으며, 축소 모델의 상세한 파라미터는 표 3~5와 같다. 그림 9의 (a)는 가상 임피던스를 적용하기 전의 Common bus 전압, 전류 파형이며 이때 전류 리플은 1.3A이다.

그림 9의 (b)는 가상 임피던스 적용 후의 Common bus 전압, 전류 파형이며 이때 전류 리플은 0.7A이다. 가상 임피던스 적용 전, 후 실험 파형을 통해 가상 임피던스 적용 시 전류 리플이 감소하는 것을 확인할 수 있다. 또한, Power analyzer를 이용하여 다이오드 정류기로 인해 발생하는 360Hz 고조파 성분에 대한 분석을 수행하였다. 분석 결과는 그림 10과 같다. 분석 결과를 통해 가상 임피던스 적용 전 6mA로 발생하던 고조파가

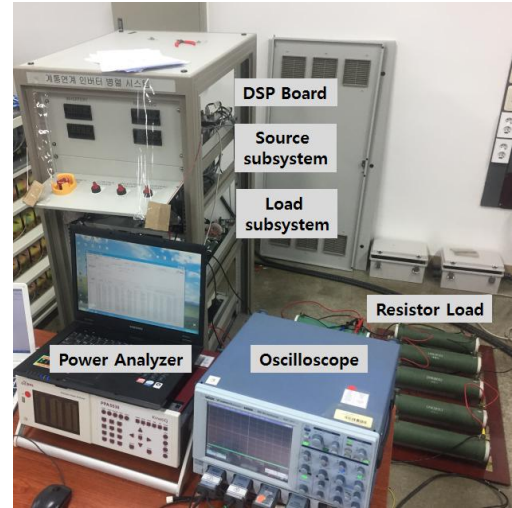
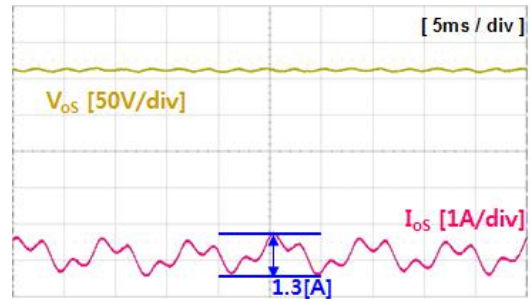
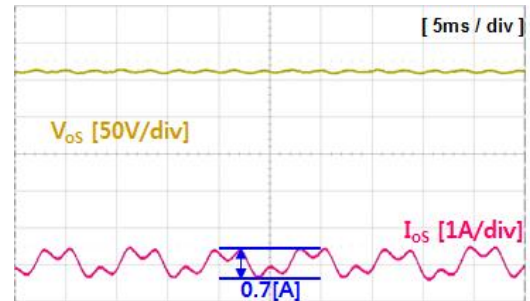


Fig. 8. Experimental equipment.



(a) Before adding virtual impedance



(b) After adding virtual impedance

Fig. 9. Experimental waveform.

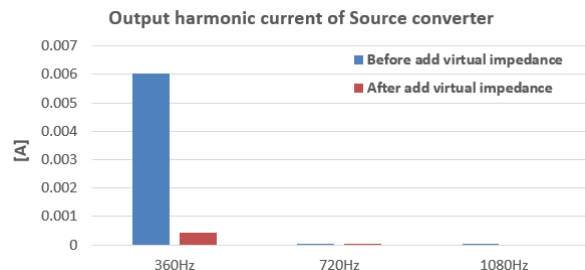


Fig. 10. Analysis results using power analyzer.

가상 임피던스 적용 후 0.4mA로 감소하는 것을 확인할 수 있다. 이를 통해 전체 시스템의 안정도가 향상됨을 알 수 있다.

5. 결 론

본 논문에서는 LC 입력 필터를 포함한 마이크로그리드 시스템의 안정도를 분석하며, 안정도 향상 제어에 대한 연구를 수행하였다. 마이크로그리드 시스템의 안정도 분석을 위해 Common bus를 기준으로 g-parameter를 이용한 모델링을 수행하였으며, Middlebrook's stability criterion을 이용하여 안정도를 판별하였다. 안정도 판정 결과 마이크로그리드 시스템이 불안정할 경우, 제어기에 가상 임피던스를 추가하여 시스템의 안정도를 향상시켰다. 마이크로그리드 시스템의 안정도 향상의 타당성을 검증하기 위해 마이크로그리드 축소 모델을 구축하여 실험을 수행하였으며 그 성능을 확인하였다.

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

References

- [1] Y. Ito, Y. Zhongqing, and H. Akagi, "DC micro-grid based distribution power generation system," in *Power Electronics and Motion Control Conference(IPEMC)*, 2004.
- [2] S. Anand, B. G. Fernandes, and J. Guerrero, "Distributed control to ensure proportional load sharing and improve voltage regulation in low-voltage DC microgrid," *IEEE Trans. Power Electron.*, Vol. 28, No. 4, pp. 1900-1913, Aug. 2012.
- [3] T. Dragicevic, X. Lu, J. Vasquez, and J. Guerrero, "DC microgrids part 1: A review of control strategies and stabilization techniques," *IEEE Trans. Power Electron.*, Vol. 31, No. 7, pp. 4876-4891. Jan. 2016.
- [4] Q. Shafiee, T. Dragicevic, J. C. Vasquez, J. M. Guerrero, "Modeling, stability analysis and active stabilization of multiple DC-microgrid cluster," in *Energy Conference (ENERGYCON)*, 2014.
- [5] Z. Zhao, J. Hu, H. Xue, R. Huang, X. Li, and X. Zhang, "Large signal stability analysis of DC microgrid under droop control with constant power load," in *Chinese Automation Congress (CAC)*, 2017.
- [6] G. Lin, Z. Wang, G. Huang, Y. Li, C. Li, and Y. Luo, "Impedance-model-based stability analysis of DC microgrid," *Industrial Electronics Society, IECON*, 2017.
- [7] X. Zhang, W. L. Ming, Q. C. Zhong, and X. B. Ruan, "Stability of a cascaded DC system via adding a virtual impedance in series with the load converter," in *Symposium on Power Electronics for Distributed Generation Systems(PEDG)*, 2015.
- [8] X. Zhang, Q. C. Zhong, and W. L. Ming, "Stabilization of cascaded DC/DC converters via adaptive series-virtual impedance control of the load converter," *IEEE Trans. Power Electron.*, Vol. 31, No. 9, pp. 6057-6063, Sep. 2016.
- [9] X. Zhang, X. Ruan, and Q. C. Zhong, "Improving the stability of cascaded systems via shaping the input impedance of the load converter with a parallel or series virtual impedance," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, Vol. 62, No. 12, pp. 7499-7512, Dec. 2015.
- [10] C. Yoon, H. Bai, R. Beres, X. Wang, C. Bak, and F. Blaabjerg, "Harmonic stability assessment for multi-paralleled, grid-connected inverters," *IEEE Trans. Sustain. Energy*, Vol. 7, No. 4, pp. 1388-1397, Oct. 2016.
- [11] S. Vesti, J. A. Oliver, R. Prieto, J. A. Cobos, J. Huusari, and T. Suntio, "Practical characterization of input-parallel-connected converters with a common input filter," in *2012 Twenty-Seventh Annual IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC)*, pp. 1845-1852, Feb. 2012.
- [12] A. Aldhaheer and A. H. Etemadi, "Stabilization and performance preservation of DC-DC cascaded systems by diminishing output impedance magnitude," *IEEE Trans. Industry Applications*, Vol. 54, No. 2, pp. 1481-1489, Oct. 2017.
- [13] R. D. Middlebrook, "Input filter considerations in design and application of switching regulators," *IEEE Industry Applicat. Soc. Annu. Meeting*, 1976 Record.
- [14] C. M. Wildwirck, F. C. Lee, B. H. Cho, and B. Choi, "A method of defining the load impedance specification for a stable distributed power system," *IEEE Trans. Power Electron.*, Vol 10, No. 3, pp. 280-285, May 1995.
- [15] S. D. Sudhoff, S. F. Glover, P. T. Lamm, D. H. Schmucker, and D. E. Delisle, "Admittance space stability analysis of power electronic system," *IEEE Trans. Aerosp. Electron.*, Vol. 36, No. 3, pp. 965-973, Jul. 2000.
- [16] X. Lu, K. Sun, J. M. Guerrero, J. C. Vasquez, L. Huang, and J. Wang, "Stability enhancement based on virtual impedance for DC microgrids with constant power load," *IEEE Trans. Smart Grid*, Vol. 6, No. 6, pp. 2770-2783, Aug. 2015.
- [17] M. N. Hussain, R. Mishra, V. Agarwal, "A self-switched virtual impedance based stabilization method for a droop controlled DC microgrid with constant power loads and input load filters," *Power Electronics, Drives and Energy Systems(PEDES)*, pp. 1-6, Dec. 2016.
- [18] R. W. Erickson and D. Maksimovic, *Fundamentals of power electronics: Second Edition*, Springer Publishers, 2001.



이재석(李載錫)

1989년 1월 22일생. 2015년 국민대 전자공학 학과 졸업. 2015년~현재 한양대 전기공학과 석박통합과정.



이기영(李基煥)

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



김래영(金來瑛)

1974년 6월 6일생. 1997년 한양대 전기공학과 졸업. 1999년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 2009년 미국 Virginia Tech 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.