

빌딩용 DC 배전 시스템의 병렬 운전 시 발생하는 순환전류를 저감시키기 위한 제어 기법

김학성¹, 신수철², 이희준², 정철호³, 한동우², 원충연[†]

Control Method for Reducing Circulating Current in Parallel Operation of DC Distribution System for Building Applications

Hack-Seong Kim¹, Soo-Cheol Shin², Hee-Jun Lee², Chul-Ho Jung², Dong-Woo Han², and Chung-Yuen Won[†]

Abstract - In the large system such DC distribution for building, the method that a number of modules converters operation in parallel is commonly used. When parallel operation, circulating current is directly related to the loss of the entire system. Accordingly, each module to share the same current is the most important for the safety of the power system. In this paper, control method for reducing circulating current in parallel operation is proposed. furthermore response and operation of steady-state with parallel system was verified by simulation and experiment results.

Keywords: circulating current, PI power controller, parallel operation, DC distribution

명명법

i_{dcB}	DC/DC 컨버터의 출력 전류
i_{dc3}	부하 전류
v_{dc}	AC/DC 컨버터의 출력 전압
v_{dcB}	DC/DC 컨버터의 출력 전압
v_{dc3}	부하 전압
P_t	부하 전력
P_2	Slave 모듈의 전력
T_{Duck}	DC/DC 컨버터 Buck모드 듀티 비
T_{Boost}	DC/DC 컨버터 Boost모드 듀티 비

1. 서론

빌딩용 직류 배전과 같은 대용량 시스템에서는 다수의 전력변환장치를 모듈화 하여 병렬 운전하는 방법이 일반적으로 사용된다. 이 방법은 낮은 전류 정격의 소자를 사용하여 대 전력, 고 효율을 실현할 수 있고, 시스템을 설계하는데 있어 각 전원 모듈의 규격화를 이룰 수 있다. 또한 시스템 보수성이 용이 할 뿐만 아니라, 각 전력변환장치 모듈은 하드웨어 설계 시 최적의 용량으로 설계됨으로써 비용 면에서도 효과적인 설계가 가

Paper number: TKPE-2013-18-3-8 ISSN: 1229-2214
[†] Corresponding author: woncy@skku.edu,
 College of Information and Communication Engineering,
 Sungkyunkwan University
 Tel: +82-31-290-7115 Fax: +82-31-290-7179
¹ School of Robot & Automation Engineering, Dongyang Mirae University.
² Dept. of Electronic Electrical and Computer Engineering, Sungkyunkwan University.
³ Dept. of Mechanical System Engineering, Sungkyunkwan University.
 Manuscript received Oct. 4, 2012 ; accepted Feb. 18, 2013
 — 본 논문은 2012년 전력전자학술대회 우수추천논문임

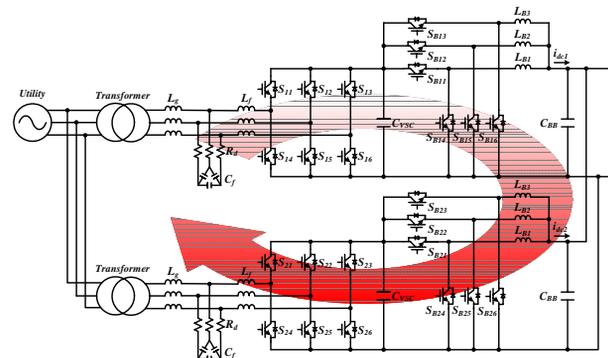


Fig. 1 The flow of the circulation current in DC power distribution system

능하다. 2대 이상의 전력변환장치에서는 각각 시스템을 제어하는데 있어 센서의 측정 오차, 제어기의 이득 값 오차, 전로 임피던스의 차이, 반도체 스위칭 소자의 특성 차이 등의 파라미터 불일치로 인하여 제어하는 전압에 차이가 발생한다. 이에 따라 병렬 구조 시스템에서는 순환전류가 필연적으로 발생하게 된다. 그림 1은 순환전류의 경로를 나타낸다. 순환전류는 무효전력 성분과 유사하여 시스템 전체의 손실과 직결되며, 연계되는 기기의 손상이나 스위칭 소자의 파괴 등과 같은 여러 가지 악영향을 미칠 수 있다^[1].

최근 이러한 순환전류를 저감시키기 위해서 여러 가지 제어방법들이 제안 되고 있다. 널리 알려진 방법으로는 병렬 시스템 입력(AC Source)단에 삼상 결합 인덕터를 추가하는 방법^[2], 유효전력(P)-주파수(f) 사이의 스피드 드롭(speed droop)과 무효전력(Q)-전압(V) 사이의 전압 드롭(voltage droop) 방법 등이 있다^[3,4,5,6].

하지만, 이러한 해결책들은 하드웨어를 추가로 구성해야 하기 때문에 전체 시스템의 부피, 무게, 비용 등을 크게 증가 시킨다. 또한 본 논문에서 제안하는 방법에서는 AC/DC 컨버터에 주파수 성분이 없는 DC/DC 컨버터를 연계하였으므로 드롭 제어를 적용시키기 어려운 단점이 있다.

본 논문에서는 빌딩용 DC 배전 시스템의 병렬 운전 시 발생하는 순환전류를 저감시키기 위한 제어 방법을 제안하고, 시뮬레이션과 실험을 통하여 병렬 운전 시스템의 타당성을 검증 하였다.

2. 제안하는 DC 배전용 병렬 운전 시스템

빌딩용 직류배전 시스템에 적용하기 위한 3상 AC/DC 컨버터는 교류 전압을 직류 전압으로 변환하여 빌딩에 직류 전력을 공급한다. 직류 전력을 이용하여 빌딩의 엘리베이터를 구동할 경우 회생에너지가 발생할 수 있으므로 교류 계통과 양방향으로 전력을 제어할 수 있어야 한다. 이와 같이 양방향 전력 제어가 가능한 시스템은

Building Integrated Photovoltaic System (BIPV) 과 같은 신재생 에너지 발전 시스템이나 Energy Storage System (ESS) 과 같은 에너지 저장 시스템과 연계하여 에너지를 효율적으로 활용할 수 있는 장점을 갖는다. 본 논문에서 제안하는 직류 배전 시스템의 사양은 입력 교류 전압 $380[V_{rms}]$ 이고, 직류 배전 전압이 $380[V_{dc}]$ 이다. 3상 AC/DC컨버터는 양방향 전력 전달이 가능하고, 승압형으로 운전되는 토폴로지를 갖는다. 3상 AC/DC 컨버터의 직류전압은 $700[V_{dc}]$ 로 제어하였고, 승강압 양방향 전력제어가 가능한 DC/DC 컨버터를 추가적으로 연계하여 배전 전압을 $380[V_{dc}]$ 로 제어하였다. 그림 2는 빌딩용 직류배전 시스템을 구성하기 위해 전력변환장치를 병렬로 연결한 것이다.

2.1 시스템 구성

그림 2는 본 논문에서 제안한 DC 배전용 병렬 시스템의 구성도이다. 3상 AC/DC 컨버터는 DC-Link 단의 커패시터가 완전 방전되어 있는 상태에서 기동할 수 있도록 초기충전 회로를 갖는다. 초기충전 회로는 커패시터가 방전되어 있는 상황에서 전원을 투입했을 시 커패시터로 입력되는 돌입전류를 방지하여 3상 AC/DC 컨버터의 IGBT와 병렬로 구성되어 있는 다이오드의 소손을 방지한다. 계통 연계 시 3상 AC/DC 컨버터는 일반적으로 수[kHz] 범위의 스위칭 주파수를 사용하게 되는데 이 범위의 스위칭 주파수는 입력 전류의 고조파를 증가시키므로 이를 방지하기 위해 LCL필터를 사용하였다^[7]. 3상 AC/DC 컨버터는 역률 및 유·무효 전력 제어가 가능하다^[8]. 양방향 DC/DC 컨버터는 3병렬로 구성하여 능동소자와 수동소자가 감당하여야 하는 전류를 분배함으로써 각 소자의 전류 스트레스를 줄일 수 있고, 시스템의 응답성을 개선시킬 수 있다. 전체 시스템의 출력 용량을 증대시키기 위하여 각 모듈간의 DC-Link 단을 공통으로 연결하여 병렬 시스템을 구성하였다. 병렬운전이 가능한 일반적인 시스템은 두 시스템 중 하나를 전류원 컨버터로 구성하여 전압원 컨버터와 연계 한다. 그러나

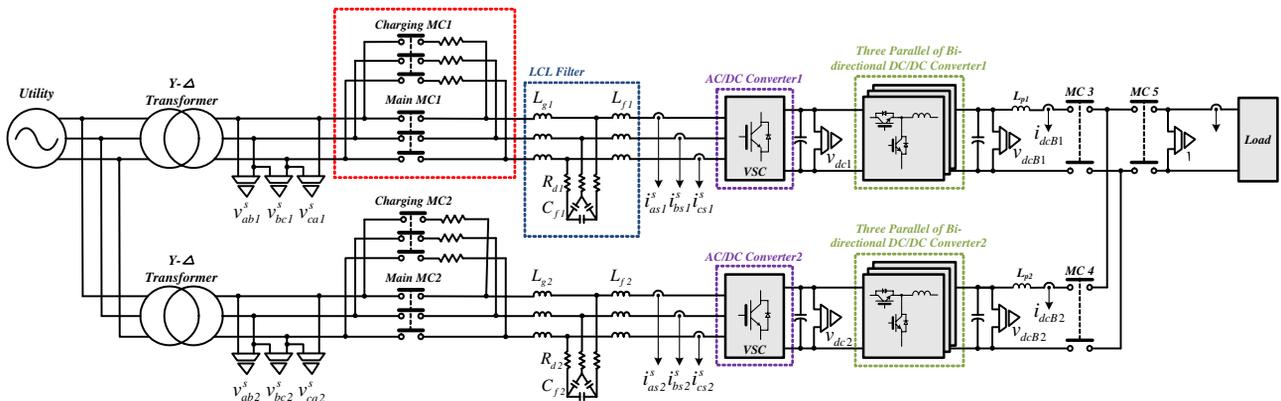


Fig. 2 DC Power distribution system for building applications

빌딩용 전력변환 장치는, 유지보수 측면에서 Master 컨버터와 Slave 컨버터의 기능을 서로 동시에 갖춰야하기 때문에 두 컨버터는 전압형 컨버터로 설계하였다. 전압원 컨버터를 두 대 이상 연계하는 경우 낮은 임피던스를 갖는 직류단 커패시터에 의하여 과도한 돌입 전류를 발생시킬 우려가 크다. 이를 해결하고자 본 시스템에서는 하드웨어적으로 L_{p1} 과 L_{p2} 를 추가적으로 구성하였다.

제안하는 시스템은 모듈단위로 제어가 된다. 따라서 다수의 모듈이 병렬로 연계되어 운전할 때, 한 개의 모듈이 고장으로 분리가 되더라도 각 Slave 모듈의 전력 지령을 통해 전력 분담을 할 수 있고 시스템은 정상적으로 운전될 수 있다.

2.2 제안하는 제어 방법 순서

제안한 PI 전력 제어를 수식으로 나타내면 식 (1)과 같다.

$$\begin{aligned}
 P_t &= i_{dc3} \times v_{dc3} \\
 P_2 &= i_{dcB2} \times v_{dcB2} \\
 P_2^* &= \frac{P_t}{N} \\
 P_{err} &= P_2^* - P_2 \\
 v_{dcB2}^*(t) &= K_p P_{err}(t) + K_i \int P_{err}(t) dt \quad (1)
 \end{aligned}$$

여기서, P_t 는 부하에 공급하는 전체 전력, P_2 는 Slave 모듈에서 공급하는 전력, N 은 시스템의 병렬 회로의 개수이다.

그림 3은 본 논문에서 제안하는 제어 방법의 순서이다. 그림 2의 컨버터 1을 Master 모듈, 컨버터 2를

Slave 모듈이라 가정하였을 때, 각 시스템은 우선 무부하 상태에서 독립적으로 전압 제어를 수행한다. 각 시스템의 전압제어 완료한 후 Parallel MC를 동작시켜 Master 컨버터와 Slave 컨버터를 병렬로 연계한다. 이때, 필터나 선로의 임피던스 성분, 센서의 이득 값 오차, 스위칭 반도체 소자의 특성 차이 등과 같은 파라미터 불일치로 인하여 시스템에 순환전류가 발생할 수 있다. 순환전류를 최소화하기 위하여 Master 모듈은 전압제어를 유지하고, Slave 모듈은 전력제어를 수행하여, 소비 전력을 0[W]로 제어한다. Slave 모듈의 전력이 0[W]일 때, 시스템의 순환 전류는 최소화 된다. 그 후 부하와 시스템을 연결하는 Load MC를 동작시킨다. 부하와 시스템의 연결 후에, 부하에 소비되는 전력을 계산하고,

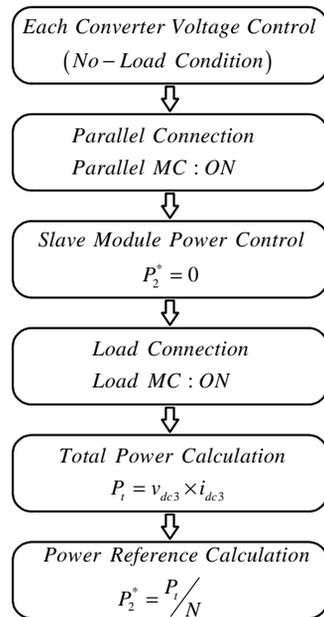


Fig. 3 Power control sequence

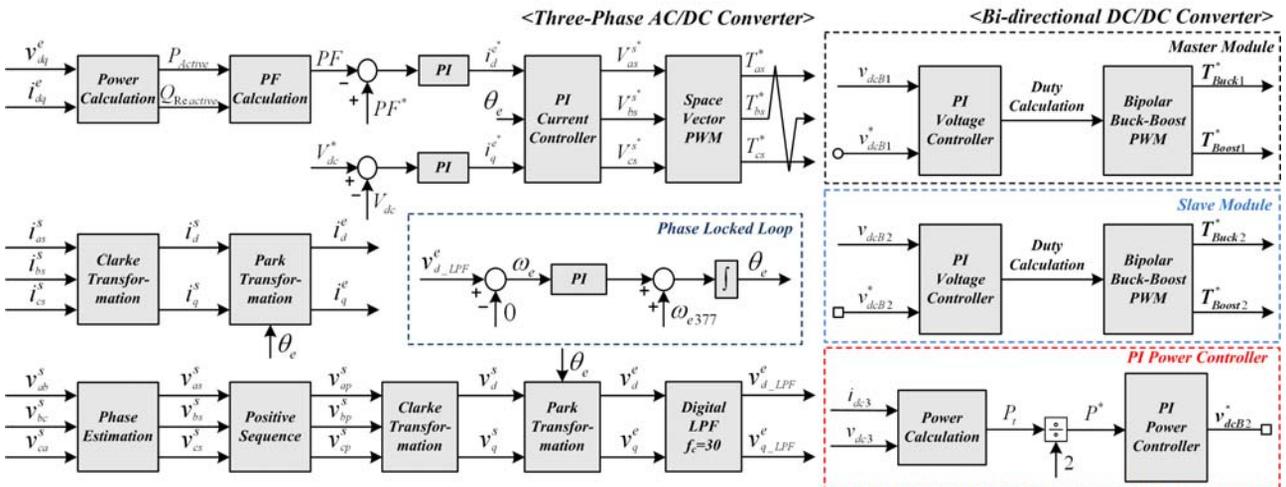


Fig. 4 Overall control blocks of DC power distribution system

Table 1 System parameters for simulation and experimental setup for DC power distribution

Parameters	Name	Value
System capacity	P	120 [kVA]
Grid voltage	E	380 [V_{rms}]
Grid frequency	f	60 [Hz]
VSC Switching frequency	f_s	5 [kHz]
VSC filter line inductance	L_g	120 [μH]
VSC filter capacitance	C_f	50 [μF]
VSC boost inductance	L_f	500 [μH]
VSC DC-Link capacitance	C_{vsc}	10200 [μF]
VSC DC-Link voltage	V_{dc}	700 [V_{dc}]
Buck-Boost inductance	L_b	700 [μH]
Buck-Boost Switching frequency	f_{bb}	7.5 [kHz]
Buck-Boost DC-Link capacitance	C_{BB}	20400 [μF]
Buck-Boost output voltage	V_{dcB}	380 [V_{dc}]

시스템의 병렬 회로 수로 나누어 Slave 모듈의 전력지령으로 이용한다.^[9]

2.3 제안하는 제어 방법 순서

그림 4는 DC 배전 시스템에 적용된 전체 제어 블록으로, 계통의 위상각을 측정하여 동기화를 시키기 위한 PLL(Phase Locked Loop), 전류와 전압의 좌표변환 블록, 전류 및 전압 제어기, 교류 계통 전압의 불 평형을 해석하기 위한 Positive Sequence Calculator, 유·무효 전력을 계산하는 유·무효 전력 계산기, 순환전류를 저감시키기 위한 PI 전력 제어기 블록 등을 포함한다. 또한 DC/DC 컨버터를 제어하기 위한 전압제어기와 순환전류 및 전력분담을 위한 전력제어기가 전압제어기의 외부에 직렬로 연결되어 있다. 초기에는 380[V]의 전압제어만 수행하고, 병렬 연계 시 전력 제어를 통해 각 모듈의 전력을 0[W]으로 제어하여 순환전류를 제어한다. 또한 부하 연계 시 전체 전력을 측정하고 이를 이용하여 Slave 모듈의 전력 지령을 통해 각 모듈에서 분담하는 전력의 양을 조절할 수 있다.

3. 시뮬레이션 결과

표 1은 시뮬레이션과 실험에 적용된 시스템의 파라미터이다. 입력전압은 3상 380 [V_{rms}], 60 [Hz]이며, 3상 AC/DC컨버터를 통하여 제어하는 직류 전압은 700 [V_{dc}], 양방향 DC/DC 컨버터를 이용하여 제어하는 전압은 380 [V_{dc}], 시스템의 스위칭 주파수는 AC/DC 컨버터는 5 [kHz], DC/DC 컨버터는 7.5 [kHz]이다. 시뮬레이션에서 그림 1과 같은 순환전류를 발생시키기 위하여 Slave 모듈에서 실제전압이 375 [V_{dc}]일 때, 380 [V_{dc}]로

인식 하도록 하여 Master 모듈과 5 [V_{dc}]의 전압이 차이 나도록 제어 하였다.

그림 5는 DC 배전 시스템이 병렬 운전 시 발생하는 순환전류의 파형을 나타낸다. 시스템이 병렬로 연계되면, 각 모듈의 출력 단에 병렬로 구성되어 있는 커패시터로 인하여 일시적으로 과전류가 발생하고, 전체 시스템에 순환전류가 흐르기 시작한다. Master 모듈에서 측정된 전류는 양의 방향으로 흐르는 전류이고, Slave 모듈에서 측정된 전류는 음의 방향으로 흐르는 전류이므로 두 시스템에서 순환전류가 발생하고 있음을 알 수 있다. 또한 순환전류를 억제하지 않으면, 시간이 경과됨에 따라 순환전류의 크기는 점점 증가하므로, 보호회로가 동작할 수 있다. 이러한 위험성은 부하를 연결한 후에도 동일하게 나타나므로 반드시 개선시켜야 한다.

그림 6은 제안한 전력 제어 방법을 적용하여 각 시스템에 전류가 정상적으로 분배되고 있는 시뮬레이션 결과 파형이다. 시뮬레이션 조건은 그림 5와 같이 Slave 모듈에서 측정된 전압은 실제전압보다 5 [V_{dc}] 작다. 두 시스템이 병렬로 연계 되면서 각 시스템의 출력 단에 커패시터로 구성된 전압원의 충돌로 인하여 발생하는 과전류는 protection inductor(L_{p1} , L_{p2})를 추가하여 방지한다. 정상상태에서 발생하는 순환전류는 제안한 전력 제어 알고리즘에 따라 Slave 모듈에서 전력 제어를 수행하여 순환전류를 강제로 0[A]로 제한한다. 그 후 부하를 연결하면, 두 시스템이 동일하게 부하 분담을 하는 것을 확인할 수 있다.

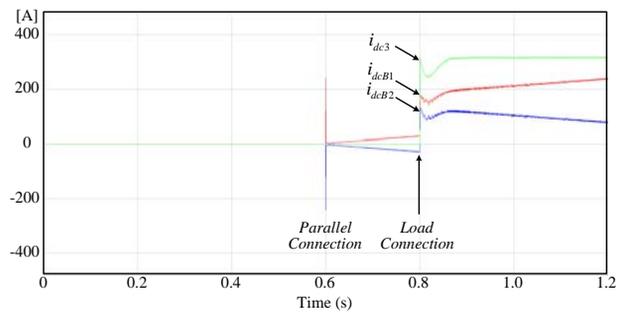


Fig. 5 Inrush current & circulation current of DC/DC converters without proposed power control

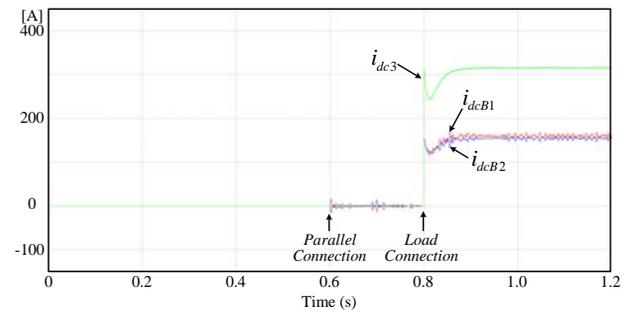


Fig. 6 Shared load current of each DC/DC converter using proposed power control

그림 7은 제안한 전력 제어를 이용한 시스템의 전체 운전 시퀀스 이다. 운전초기에 방전되어 있는 커패시터로 흐르는 과전류를 방지하기 위하여 초기충전 회로와 IGBT의 다이오드를 통하여 정류되어진 전류는 DC-Link 단의 커패시터에 충전이 된다. 그 후, 목표 전압으로 제어하기 위하여 PWM을 시작하고 제어하고자 하는 700[V_{dc}]까지 승압 한다. AC/DC 컨버터의 전압 제어 완료 후, DC/DC 컨버터의 전압 제어를 수행하여 380[V_{dc}]의 전압으로 강압시켜 DC BUS에 일정한 전압을 공급한다.

4. 실험 결과

4.1 실험 세트 구성

그림 8은 실험에 적용한 빌딩용 직류배전 시스템의 Master 모듈의 하드웨어 구성이다. Master 모듈과 Slave 모듈은 하드웨어적으로 동일하므로 Master 모듈만 표현하였다. 그림 (a)는 Master 모듈의 Control 부분으로, 그림 2에서 나타낸 AC/DC 컨버터와, DC/DC 컨버터, 그리고 제어보드로 구성된다. 그림 (b)는 그림 2에서 나타낸 충전회로이다. 그림 (c)는 그림 2에서 나타낸 LCL 필터이다. 그림 (d)는 그림 2에서 나타낸 병렬연계 MC와 부하연결 MC 그리고 병렬 연계 시 발생하는 과전류를 보호하기 위한 L_{p1} , L_{p2} 등으로 구성되어 있다. 시스템의 하드웨어 사양은 표 1과 동일하다.

4.2 실험 결과 파형

그림 9는 DC 배전 시스템의 실험 결과 파형이다. 본 논문에서 제안하는 제어 방법의 타당성을 검증하기 위하여 21[kW]의 부하에서 시뮬레이션과 동일한 조건으로 실험을 진행하였다. 그림 (a)는 과전류를 보호하기 위한 L_{p1} , L_{p2} 를 설치하지 않고, 제안한 전력제어 알고리즘을 수행하지 않았을 때 실험 파형이다. 그림 5에서 보인 시뮬레이션 결과와 같이 병렬 연계 시 돌입전류를 동반하고, 순환전류는 시간에 따라 증가하는 것을 볼 수 있다. 그림 (b)는 과전류를 보호하기 위한 L_{p1} , L_{p2} 를 설치하고, 제안한 전력제어 알고리즘 적용 시 실험 파형이다.

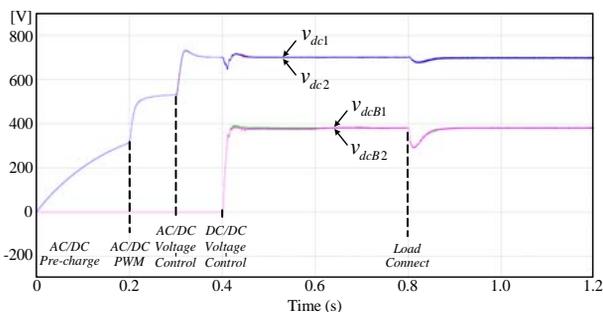
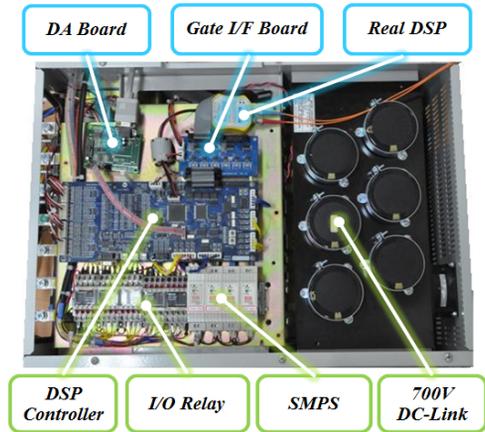
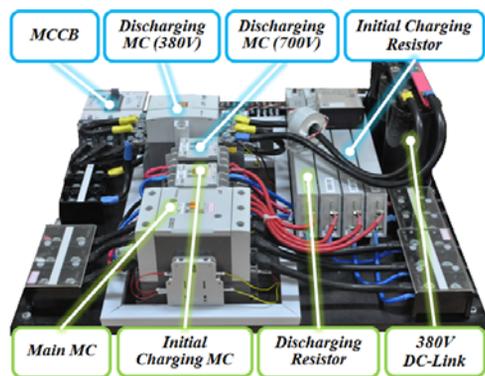


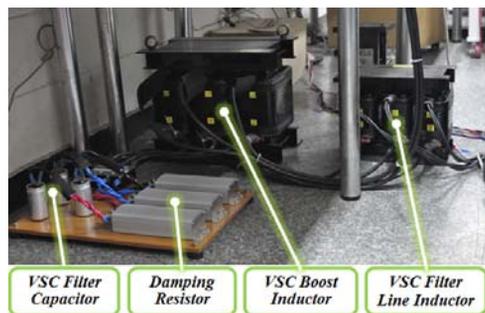
Fig. 7 Overall system sequence of DC power distribution system



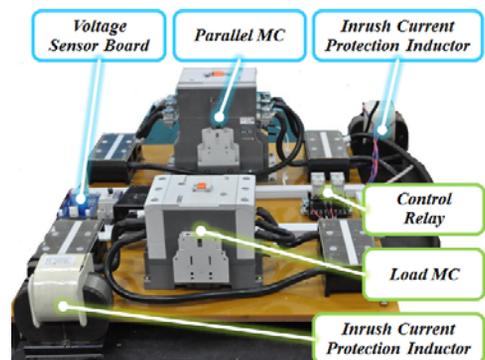
(a) Control & Converter parts



(b) Charge circuit parts



(c) LCL-Filter parts



(d) Parallel connection parts

Fig. 8 Experimental setup

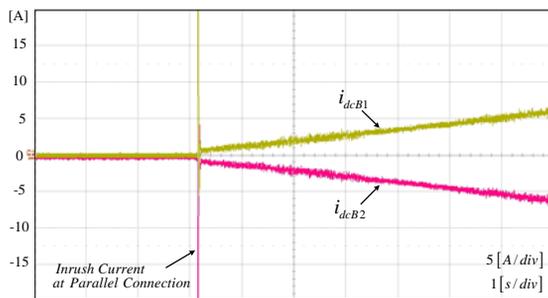
그림 6과 7에서 보인 시뮬레이션 결과와 같이 전압 제어 하에 병렬 연계 시 돌입전류가 저감되고, 순환전류가 최소화된 결과를 보인다. 그림 (c)는 21[kW]에 해당하는 부하를 투입 하였을 때, Master 모듈과 Slave 모듈이 담당하는 부하전류이다. 제안한 순환전류 최소화 방법을 적용 하였을 때, Slave 모듈의 전력지령을 통하여 Master 모듈과 Slave 모듈은 안정적으로 50[%]의 부하에 해당하는 전류를 27.5[A]씩 나누어 분담하는 것을 실험을 통하여 검증 하였다.

5. 결 론

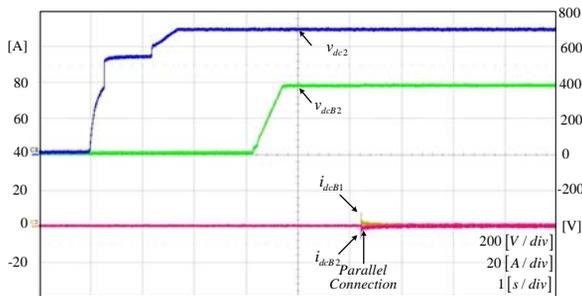
본 논문에서는 커패시턴스를 갖는 전압원 컨버터의

병렬 운전 시 발생하는 돌입전류와 순환전류의 최소화 방법을 제안한다. 제안한 방법의 타당성은 시뮬레이션과 실험을 통하여, 전압원 형태의 컨버터 병렬운전 시 필연적으로 발생할 수 있는 돌입전류와 순환전류를 적절하게 제어한다. 이에 따라, 직류 배전 시스템과 같은 대용량 병렬운전 시스템에서 활용 가능하다. 또한, 병렬운전 시스템의 병렬 회로수를 증가시켜 시스템의 용량을 증가시키는 경우에, 제안한 순환전류 최소화 방법이 적용 가능할 것으로 기대된다.

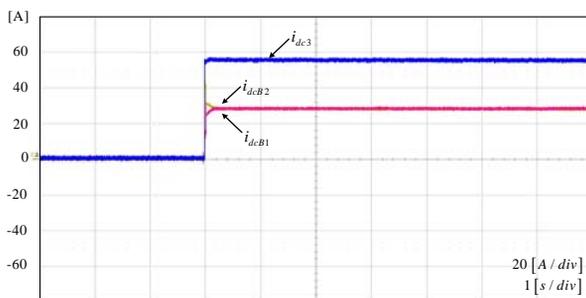
본 연구는 2012년도 동양미래대학교 학술연구 과제 지원에 의하여 이루어졌음을 알려드립니다.



(a) Inrush current & circulation current of DC/DC converters without proposed power control



(b) Circulation current & controlled voltage using proposed power control



(c) Shared load current of each DC/DC converter using proposed power control

Fig. 9 Comparison of experimental waveform following each condition

References

- [1] J. H. Lee, M. Y. Cha, B. M. Han, "A Droop Control for the Autonomous Operation of DC Distribution System using Grid-tied Converter and Energy Storage," *on Power electronics annual conference*, pp. 32-33. 11, 2010.
- [2] L.Asiminoaei, E. Aeloiza, P. N. Enjeti, and F. Blaabjerg, "Shunt active-power-filter topology based on parallel interleaved inverters," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, Vol. 55, No. 3, pp. 1175-1189, Mar. 2008.
- [3] F.Katiraei, M.R. Irvani, "Power management strategies for a Microgrid with multiple distributed generation units," *IEEE Trans. On Power Systems*, 2006.
- [4] M. chandorkar, D. Divan, and B. Banerjee, "Control of distributed UPS systems," *IEEE PESC'94*, pp. 197-204, 1994.
- [5] J.Guerrero, L. Na, M. Castilla, and J. Miret, "A wireless controller to enhance dynamic performance of parallel inverters in distributed generation system," *IEEE Trans. on Power Electronics*, Vol. 19, No. 5, pp. 1205-1213, Sep. 2004.
- [6] N. Pogaku, M. Prodanovic, and T. Green, "Modeling, analysis and testing of autonomous operation of an inverter-based microgrid," *IEEE Trans. on Power Electronics*, Vol. 22, No. 2, pp. 613-625, Mar. 2007.
- [7] M. Liserre, F.Blaabjerg, S.Hansen, "Design and Control of An LCL Filter Based Active Rectifier," *IEEE Trans. on Ind. App.*, Vol. 38, No. 2, pp. 299-307, Sep/Oct. 2001.
- [8] J. W. Choi, S. K. Sul, "Fast Current Controller in Three-phase AC/DC Boost Converter Using d-q Axis Crosscoupling," *IEEE Trans. Power Electronics*, Vol. 13, No. 1, pp. 179-185, Jan. 1998.
- [9] C. H. Jung, S. C. Shin, T. B. Jung, T. K. Lee, C. Y. Won, "Control Algorithm for Circulating Currents in Parallel Operation of Three-Phase AC/DC Converter for DC Distribution System," *on Power electronics annual conference*, pp. 167-168, 2011.



김학성(金學成)

1964년 11월 8일생. 1989년 성균관대 전기공학과 졸업. 1992년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1996년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학박). 1997년~현재 동양미래대 로봇자동화공학부 교수. 당 학회 학술이사.



신수철(申守澈)

1977년 2월 27일생. 2004년 수원대 전기전자공학부 졸업. 2006년 성균관대 대학원 에너지시스템공학과 졸업(석사). 2006년~2010년 호성 중공업연구소 선임연구원. 2010년~현재 동 대학원 전자전기컴퓨터공학과 박사과정.



이희준(李羲俊)

1982년 9월 30일생. 순천향대 정보통신공학부 졸업. 2011년 성균관대 대학원 메카트로닉스 협동과정 졸업(석사). 현재 동 대학원 전자전기컴퓨터공학과 박사과정.



정철호(鄭哲號)

1985년 2월 27일생. 2011년 안양대 전기전자공학부 졸업. 2013년 성균관대 대학원 메카트로닉스 협동과정 졸업(석사). 2013년~현재 LG 전자 HE 사업본부 근무.



한동우(韓東佑)

1985년 4월 7일생. 2012년 숭실대 전기공학부 졸업. 2012년~현재 성균관대 대학원 전자전기컴퓨터공학과 석사과정.



원충연(元忠淵)

1955년 5월 10일생. 1978년 성균관대 공대 전기공학과 졸업. 1980년 서울대 전기공학과 졸업(석사). 1987년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학박). 1991년 12월~1992년 12월 미국 테네시 주립대학 전기공학과 방문 교수. 1998년~현재 한국철도기술연구원 심사위원. 2006년~2009년 한국전력공사 PQ 심사위원. 2006년~2009년 차세대 첨단도시철도시스템(한국건설교통기술 평가원) 기술개발사업 운영위원. 2006년~현재 (주)로템 기술자문위원. 2010년~현재 도시철도 공사 기술검증위원. 2007년~2012년 삼성전기 에너지파워연구 센터장. 2011년~현재 한국토지주택공사 기술심사 평가위원. 2010년 당 학회 회장. 현재 성균관대 정보통신공학부 교수.