

마이크로그리드에서 에너지 저장시스템을 위한 무순단 절체 기능을 갖는 계통연계형 인버터의 병렬운전 제어기법

박성열¹, 김주하², 정아진³, 최세완[†]

Parallel Operation Control Method of Grid-connected Inverters with Seamless Transfer for Energy Storage System in Microgrid

Sung-Youl Park¹, Joo-Ha Kim², Ah-Jin Jung³, and Se-Wan Choi[†]

Abstract

In the microgrid, inverters for energy storage system are generally constructed in a parallel structure because of capacity expandability, convenience of system maintenance, and reliability improvement. Parallel inverters are required to provide stable voltage to the critical load in PCC and to accurately share the current between each inverter. Furthermore, when islanding occurs, the inverters should change its operating mode from grid-connected mode to stand-alone mode. However, during clearing time and control mode change, the conventional control method has a negative impact on the critical load, that is, severe fluctuating voltage. In this study, a parallel operation control method is proposed. This method provides seamless mode transfer for the entire transition period, including clearing time and control mode change, and has accurate current sharing between each inverter. The proposed control method is validated through simulation and experiment.

Key words: Microgrid, ESS(Energy Storage System), Master-slave, Seamless mode transfer, Indirect current control, Critical load

1. 서 론

최근 태양광, 풍력 등 신재생 에너지와 에너지 저장 시스템(ESS)으로 구성된 마이크로그리드에서 ESS의 중요성이 부각되고 있다.^{[1][2]} 그림 1은 부하 전력을 자체적으로 공급할 수 있는 마이크로그리드의 개념도이다.^{[3][4]} 마이크로그리드에서 ESS용 인버터는 용량의 확장성, 시스템의 보수편리, 신뢰성 향상 등의 이유로 주로 모듈화 되어 진다. 그러나 모듈화 된 인버터는 모듈 간 특성 차

이로 인해 순환 전류가 발생할 수 있기 때문에 정확한 전류 분담이 가능한 병렬 운전 제어기법이 요구된다. 기존의 병렬운전 제어기법은 분산식, 마스터-슬레이브, 집중식 제어방식이 있다.^[5] 분산식 제어기법은 부하분담을 위한 신호선이 없으므로 감지잡음이나 상호 간섭문제가 없으며 장소와 환경에 무관하게 설치가 가능한 장점이 있지만, 인버터와 부하를 연결하는 선로 임피던스 차이로 인해 모듈간의 부하분담이 정확하지 않고 전압의 크기 및 주파수 품질저하가 발생하며 독립운전에서 계통연계 모드전환 시 추가의 중앙제어기가 필요한 단점이 있다. 마스터-슬레이브 기법은 부하분담 시 응답속도가 빠른 장점이 있지만 인버터 모듈간의 신호선이 필요하며 인버터 모듈간의 거리가 멀어 신호선이 길어질 경우 감지잡음이나 상호 간섭문제가 발생하는 단점이 있다.^[6] 집중식 제어방식은 신호선의 문제가 있고 부하분담을 위해 별도의 중앙 제어기와 부하 전류를 센싱하기 때문에 용량의 확장성의 한계가 있다는 단점이 있다. 이러한 병렬 운전 제어 방식의 특성을 고려해보면, ESS의 모듈화 된 인버터는 거리가 매우 가깝고 신호선의 제약이

Paper number: TKPE-2016-21-3-2

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

[†] Corresponding author: schoi@seoultech.ac.kr, Dept. of Electrical & Information Eng., Seoul Nat'l Univ. of Science and Technology

Tel: +82-2-970-6542 Fax: +82-2-972-2866

¹ Dept. of Electrical & Information Eng., Seoul Nat'l Univ. of Science and Technology

² Vehicle Control Technology

³ Korea Automotive Technology Institute

Manuscript received Jan. 14, 2016; revised Feb. 17, 2016; accepted Mar. 28, 2016

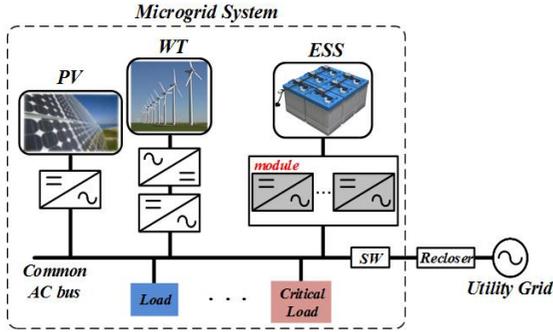


Fig. 1. Microgrid architecture.

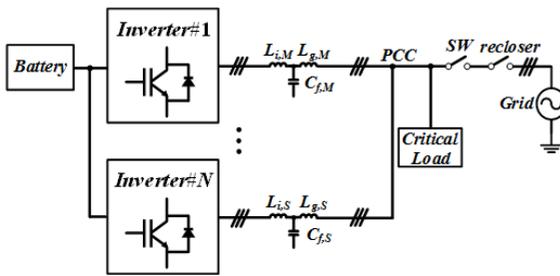


Fig. 2. System configuration of the ESS, including the grid connected parallel inverters.

없으므로 부하분담 시 응답속도가 빠르며 정확한 부하 분담이 가능한 마스터-슬레이브 기법이 적합하다.

그림 2는 중요부하를 가지는 ESS의 회로도를 나타낸다. ESS용 병렬 인버터에서는 PCC에서 중요부하를 공유하고 있기 때문에 항상 안정적인 전력을 공급해야 한다. 그러나 계통이상 등으로 인해 Recloser가 차단되면 인버터가 이를 감지하지 못하고 부하에 지속적으로 전력을 공급하는 단독운전 상황이 발생하게 되는데, 인버터는 이를 감지하여 계통과의 연결을 끊고 전류제어를 하는 계통연계모드에서 출력 전압을 제어하는 독립운전 모드로 전환하여 중요 부하에 안정적인 전력을 공급하여야 한다.^[7] 그러나 기존 제어 기법은 단독운전 상황인 clearing time 동안 부하전압이 변동할 수 있고, 독립운전으로 모드 전환 시 과도상태가 발생할 수 있어 중요부하에 악영향을 끼칠 수 있다. 따라서 단독운전 검출 전뿐 아니라 모드 전환 시에도 부하전압의 과도현상을 최소화하는 모드 전환기법이 필수적이다.^{[8][9]}

본 논문에서는 clearing time과 모드 전환 시 중요부하에 안정적인 전압 공급과 각 인버터간의 정확한 전류 분담이 가능하게 하는 병렬 운전 제어 기법을 제안한다.

2. 제안하는 마스터-슬레이브 병렬 운전 제어 기법

2.1 기존 계통연계형 인버터의 마스터-슬레이브 병렬 운전 제어기법의 문제점

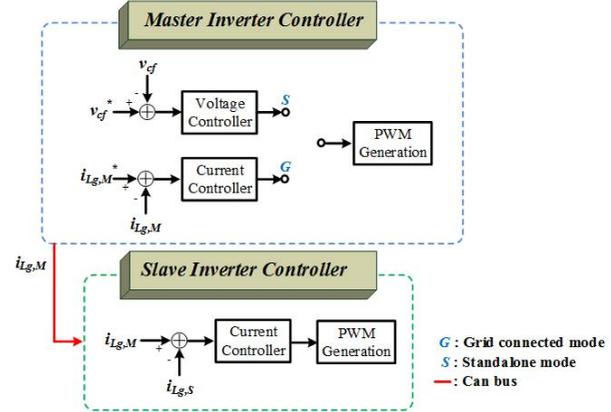


Fig. 3. Conventional master-slave control method for grid-connected parallel inverters.

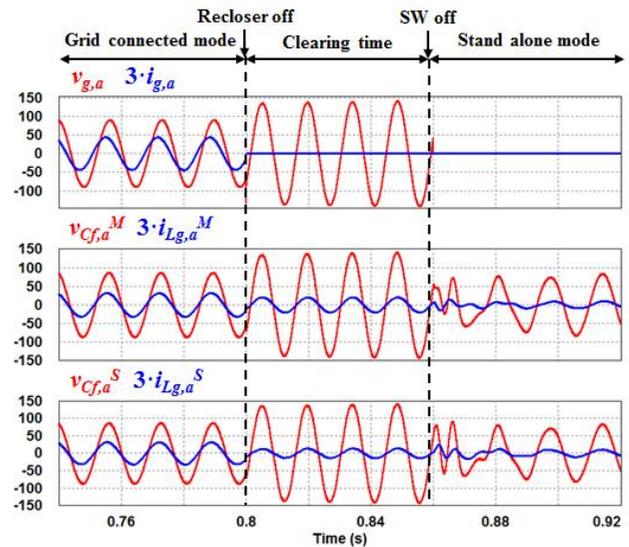


Fig. 4. Simulation results of conventional master-slave control for grid connected mode, clearing time and stand alone mode.

그림 3은 일반적인 인버터의 마스터-슬레이브 병렬 운전 제어 기법이다. 마스터 인버터는 독립운전모드(S)에서 캐패시터 전압($v_{cf,M}$)을 제어하고, 계통 연계 모드(G)에서는 전류($i_{Lg,M}$)를 제어한다. 그리고 N-1대의 슬레이브 인버터는 공유된 Can bus를 통하여 마스터 인버터로부터 전류($i_{Lg,M}$)를 전송받아 지령치로 하여 전류($i_{Lg,S}$)를 제어한다.

단독운전 발생 시, 직접전류제어 방법은 인버터의 출력 파워 및 부하 조건에 따라서 부하전압이 변동할 수 있으며, 독립운전으로 모드 전환할 경우 전류 제어기에서 전압 제어기로 교체하는 과정에서 제어기 절체로 인한 과도상태가 발생하여 중요부하에 악영향을 미치게 된다. 그림 4는 기존 제어 방법을 적용한 인버터에서 단독운전이 일어났을 경우의 시뮬레이션 파형이다. clearing time에 출력전압의 크기, 주파수가 등이 크게

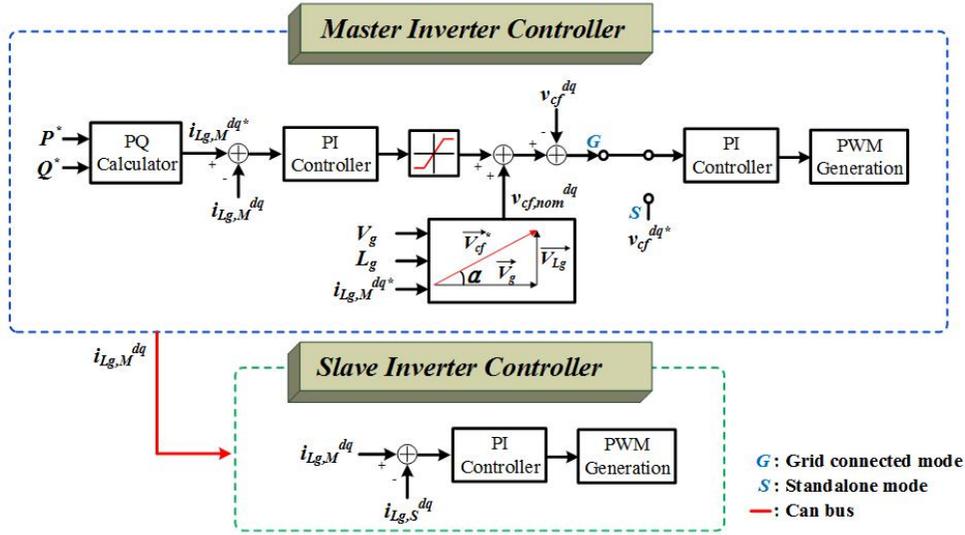


Fig. 5. Block diagram of the proposed modified master-slave control method for grid-connect parallel inverters.

변동하고, 모드 전환 시 과도상태가 발생하는 것을 확인할 수 있다.

2.2 제안하는 무순단 절체 기능을 갖는 인버터의 병렬운전 제어기법

그림 5는 제안하는 계통연계 형 인버터의 병렬운전 제어블록도이다. S와 G는 각각 독립운전과 계통연계 모드를 나타낸다. 동기좌표변환을 이용하여 3상의 정지좌표계 전압·전류를 2상 동기좌표계로 바꾸어 제어한다. 전압·전류 제어기는 비례적분(Proportional-Integral) 보상기를 이용한다. 마스터 인버터는 독립운전 모드에서 캐패시터 전압($v_{Cf,M}^{dq}$)을 제어한다. 계통연계 모드에서는 외부 루프에서 인덕터 전류($i_{Lg,M}^{dq}$)를 제어하고, 내부 루프에서는 캐패시터 전압($v_{Cf,M}^{dq}$)을 제어한다.

전류의 지령치는 제어하고자 하는 유·무효전력 P^*, Q^* 를 수식 (1)과 (2)를 이용하여 전류 지령치($i_{Lg,M}^{dq}$)를 계산한다.

$$I_{Lg,M}^d = \frac{\frac{2}{3}(P^* V_g^d + Q^* V_g^q)}{(V_g^d)^2 + (V_g^q)^2} \quad (1)$$

$$I_{Lg,M}^q = \frac{\frac{2}{3}(P^* V_g^q - Q^* V_g^d)}{(V_g^d)^2 + (V_g^q)^2} \quad (2)$$

간접전류제어^[8] 수식(3)과 (4)를 이용하여 계산한 캐패시터 전압($v_{Cf,nom}^{dq}$)에 전류 제어기 보상 값을 더한 값이 캐패시터 전압 지령치(v_{Cf}^{dq*})가 된다.

$$v_{Cf,nom}^d = |V_g| \quad (3)$$

$$v_{Cf,nom}^q = |v_{Lg}| = i_{Lg}^{d*} \times \omega L_g \quad (4)$$

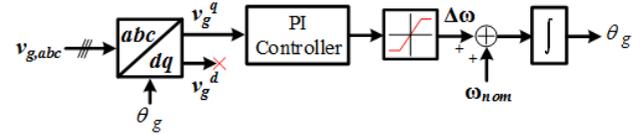


Fig. 6. Block diagram of PLL control method.

최종적으로 마스터 인버터는 계통 연계 모드에서 간접 전류제어 기반으로 계통연계 및 독립운전 모두 전압 제어를 수행한다. 슬레이브 인버터는 마스터 인버터와 Can bus를 공유하여 마스터 인버터의 전류($i_{Lg,M}^{dq}$)를 전송받아 독립 운전과 계통연계 모두 전류를 제어한다.

계통이상 시 마스터 인버터는 단독운전 중에도 전압을 제어하므로 전압 변동이 작으며, 그림 6와 같이 마스터 인버터 PLL 제어기 출력을 제한시켜 줌으로서, 주파수 변동을 제한 시켜주었다. 그래서 단독운전이 발생하더라도 전압의 크기 및 주파수 변동이 제한되므로 중요 부하에 안정적인 전압을 공급할 수 있다. 또한 단독운전을 감지하여 계통연계에서 독립운전으로 모드 전환할 경우에도 전압제어를 계속 해주게 되어 기존 제어기 절체로 인한 과도 상태없이 전환할 수 있다.

2.3 제안하는 제어기법의 주요 동작원리

그림 7은 R-L 부하를 공유하고 있는 마스터-슬레이브 인버터에서 계통연계 중 계통과의 연결이 끊겼을 경우 인버터의 각 모드별 파형을 나타낸 것이다.

Grid connected mode [$t_0 \sim t_1$] : 병렬 연결된 인버터는 계통과 연계되어 중요부하 및 계통에 전력을 공급한다. 이때 마스터 인버터는 CAN통신으로 전류의 dq성분을 슬레이브 인버터로 전송하고 마스터 인버터는 간접 전류 제어, 슬레이브 인버터는 직접 전류 제어를 수행한다.

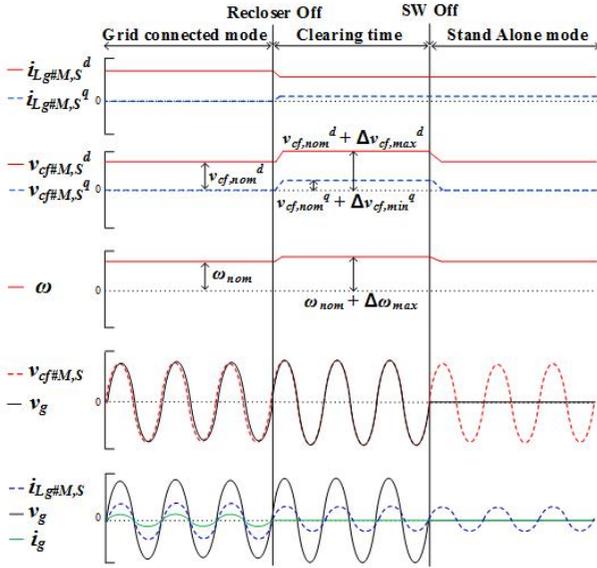


Fig. 7. Key waveforms of transition from grid-connected mode to islanding mode.

Clearing time [$t_1 \sim t_2$] : t_1 에서 계통이상이 발생했을 때 계통에서 제어하는 Recloser가 열리고 인버터는 이를 판단하지 못해 SW가 닫힌 상태인 clearing time 구간이 발생한다. clearing time 동안 마스터 인버터의 외부 루프 제어기인 전류 제어기는 d축 전류는 리미터의 상한치인 $\Delta v_{cf,max}^d$ 값으로, q축 전류는 리미터의 상한치인 $\Delta v_{cf,min}^q$ 값으로 포화되고 각각 $v_{cf,nom}^d$ 값과 더해져 전압의 dq지령치를 만들게 되며, PLL제어의 출력은 리미터의 상한치인 $\Delta \omega_{max}$ 값으로 포화되고 $\Delta \omega_{nom}$ 과 더해져 일정한 주파수를 출력한다. 마스터 인버터는 내부 루프에 있는 전압제어를 수행하여 전압 변동이 거의 없이 부하 전압을 공급할 수 있으며, 슬레이브 인버터는 전류제어를 계속 수행한다.

Stand alone mode [$t_2 \sim$] : t_2 에서 인버터는 단독운전을 감지하고 SW를 닫은 후 마스터 인버터는 독립운전으로 제어모드를 전환하며, 슬레이브 인버터는 변동없이 전류제어를 수행한다. 이때 제어기 절체가 없어 과도상태없이 모드전환을 한다.

3. 시뮬레이션 및 실험결과

제안하는 제어기법을 검증하기 위하여 PSIM 시뮬레이션 및 실험을 수행하였다. 마스터, 슬레이브 인버터 각 1대씩 구성 하였으며 시뮬레이션 및 실험을 위한 시스템 파라미터는 표 1과 같다.

그림 8은 독립운전모드에서 각 인버터간의 정확한 전류분담이 되는 것을 시뮬레이션한 파형이다. 독립운전시에 마스터 인버터는 전압제어를 하고, 슬레이브 인버

TABLE I
SYSTEM SPECIFICATION

P_{Load}	1kW	V_{LL}	110V	f_{sw}	10kHz
$L_{\#M,S}$	1.78mH	$C_{\#M,S}$	3uF	$L_{g\#M,S}$	3mH

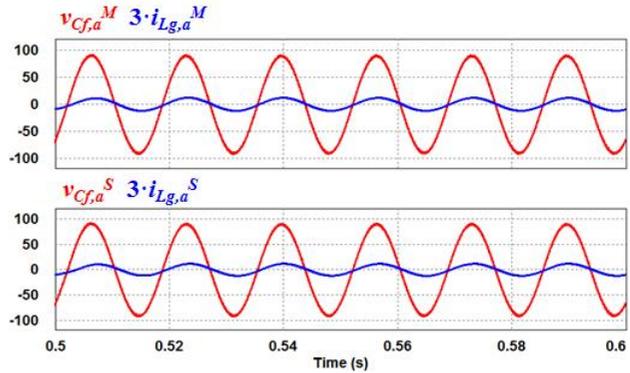


Fig. 8. In stand-alone mode, simulation results of proposed master-slave control for current sharing.

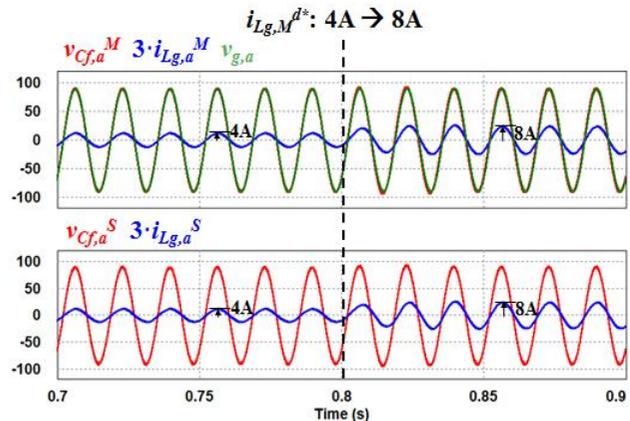
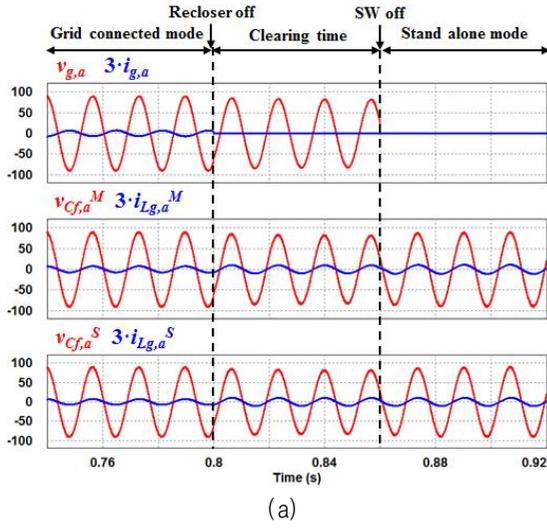


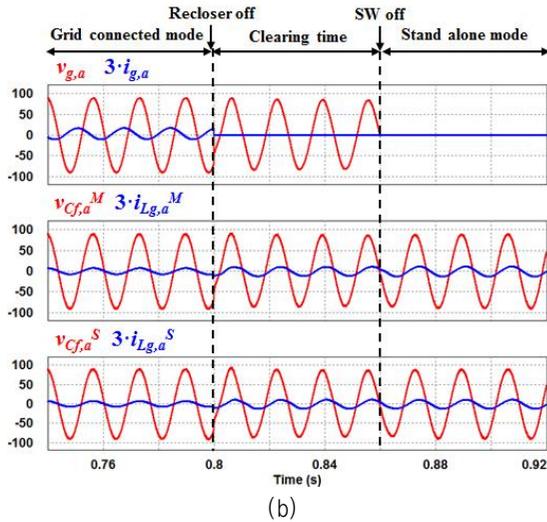
Fig. 9. In grid-connected mode, simulation results of proposed master-slave control for current reference variation.

터는 마스터 출력 전류 ($i_{Lg,M}^{dq}$)를 지령치로 하여 전류 ($i_{Lg,S}^{dq}$)제어를 하게 된다. 그림 9는 계통연계모드에서 마스터 인버터의 전류 크기 지령치($i_{Lg,M}^{d*}$)를 변경시켜 주었을 때 각 인버터간의 정확한 전류 분담이 되는 것을 시뮬레이션한 파형이다. 계통연계 시에 마스터 인버터는 간접전류제어를 하고, 슬레이브 인버터는 독립운전 시와 동일한 전류제어를 수행한다.

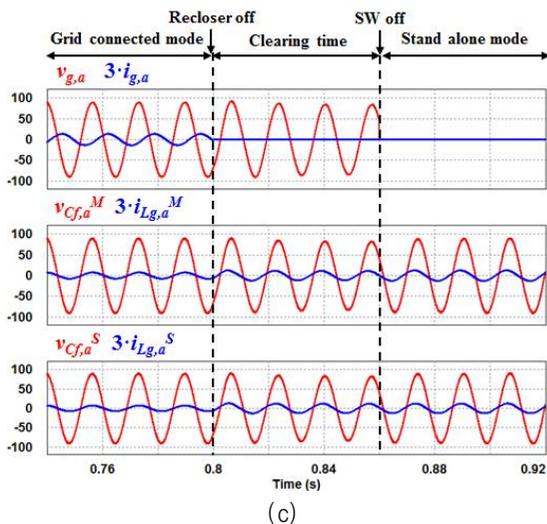
그림 10은 저항 및 리액턴스 성분이 포함된 부하조건에서 계통연계 중 단독운전이 발생한 상황을 시뮬레이션 한 것이다. 기존 제어에서는 그림 4와 같이 clearing time동안 부하 전압의 크기, 주파수가 변동하고 모드전환 시에도 과도상태가 발생하여 부하에 불안정한 전압을 공급하게 되지만, 제안한 제어 기법이 적용한 시뮬레이션 결과에서는 clearing time동안에 전압의 크기 및



(a)



(b)



(c)

Fig. 10. Simulation results of proposed master-slave control for grid connected mode, clearing time and stand alone mode. (a) R load, PF = 1, (b) R-L load, PF = 0.9, (c) R-C load, PF = 0.9

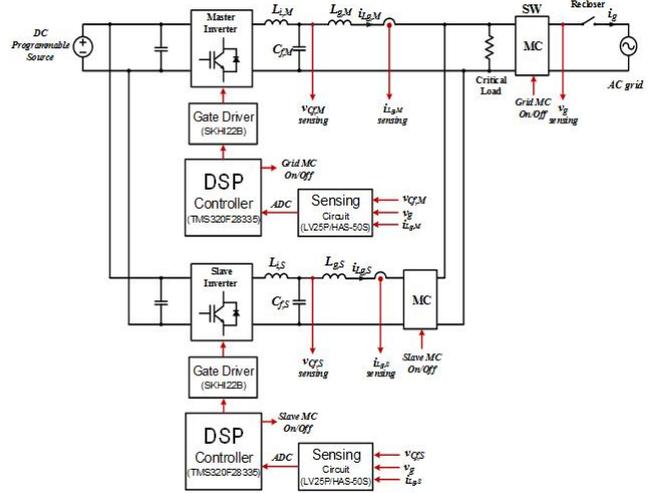


Fig. 11. Block diagram of experimental setup.

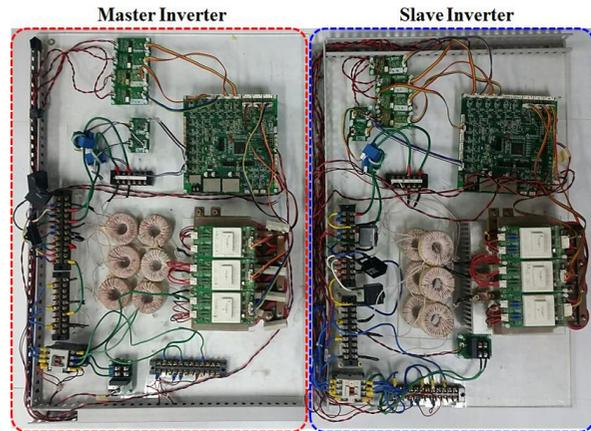


Fig. 12. Photograph of the laboratory prototype.

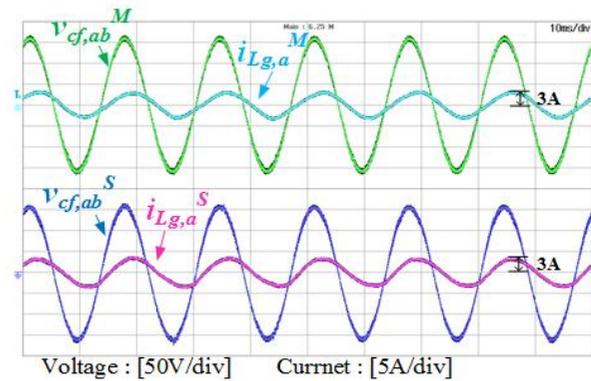


Fig. 13. In stand alone mode experimental waveform of the proposed master-slave control for current sharing.

주파수 변동이 거의 없으며, 모드전환 시에도 과도상태 없이 전환되는 것을 확인할 수 있다.

그림 11은 전체 실험 구성도이다. 마스터, 슬레이브 인버터 각 1대씩 구성하였다. 인버터의 IGBT는 세미콘사

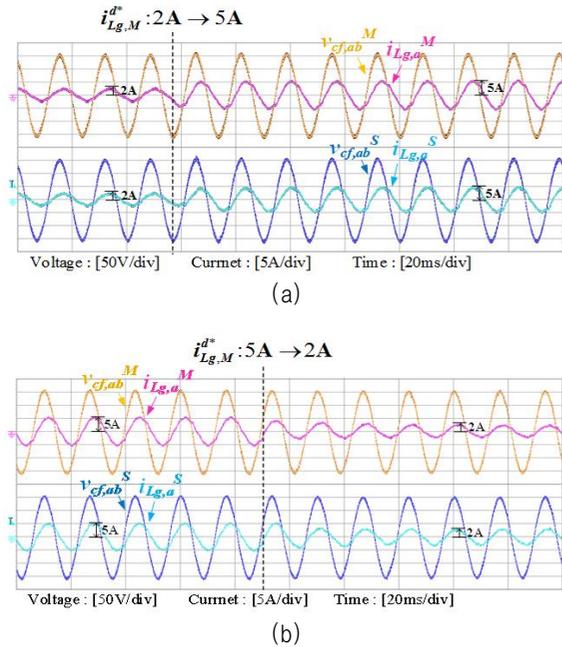


Fig. 14. In grid-connected mode, experimental waveforms of the proposed master-slave control for current reference variation when (a) Current reference is increased and (b) Current reference is decreased.

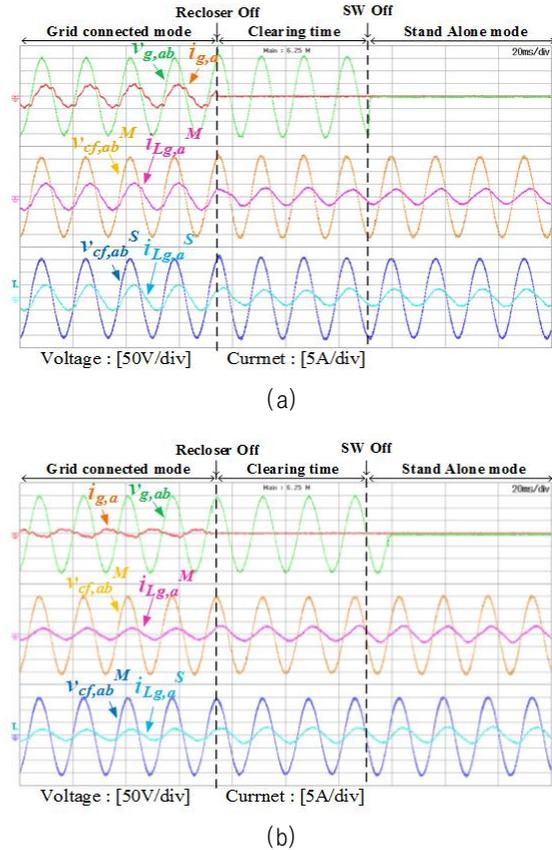


Fig. 15. Experiment waveforms of the proposed master-slave control when islanding occurs. (a) Inverter power is 0.5kW and (b) Inverter power is 1.4kW during grid connected mode.

의 SKM75GB128D를 사용하였고 DSP(TMS320F28335) 프로세서를 이용하여 제어보드를 구성하였으며, 모드 전환을 위한 SW로 MC(Magnetic Contactor)를 이용하여 계통과의 접속/차단이 이루어지게 하였다. 그림 12는 축소 시작품의 사진이다.

그림 13과 그림 14는 각각 독립운전과 계통연계 상황에서 각 인버터의 전류 분담이 정확히 되는 것을 검증한 실험 파형이며, 그림 15는 계통연계 중 단독운전이 발생하였을 때 clearing time과 모드전환 시를 측정할 실험 파형이다. 시뮬레이션 파형과 동일하게 부하에 항상 안정적인 전압이 공급되는 것을 확인할 수 있다. 그림 15(a)는 계통연계 시 인버터 출력 전력이 부하 전력보다 큰 경우이며, 그림 15(b)는 계통연계 시 인버터 출력 전력이 부하 전력보다 작은 경우이다.

4. 결 론

본 논문에서는 중요부하를 가지는 마이크로그리드에서 ESS용 병렬 인버터에 적합한 병렬 운전 제어 기법을 제안하였다. 제안하는 방법은 병렬 인버터 간의 정확한 전류 분담이 가능하게 하며, clearing time과 모드 전환 시에도 중요부하에 안정적인 전압을 공급할 수 있다. PSIM을 이용한 모의 실험과 1kW급 축소시작품을 통한 실험 결과로 본 논문의 타당성을 입증하였다.

본 연구는 산업통상자원부(MOTIE)와 한국에너지기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구 과제입니다.(No. 20142010102600)

References

- [1] D. E. Olivares et al., "Trends in microgrid control," *IEEE Trans. Smart Grid*, Vol. 5, No. 4, pp. 1905 - 1919, Jul. 2014.
- [2] H. Zhou, T. Bhattacharya, D. Tran, T. S. T. Siew, and A. M. Khambadkone, "Composite energy storage system involving battery and ultracapacitor with dynamic energy management in microgrid applications," *IEEE Trans. Power Electron.*, Vol. 26, No. 3, pp. 923-930, Mar. 2011.
- [3] C. Chen, Y.Wang, J. Lai, Y. Lee and D. Martin, "Design of parallel inverters for smooth mode transfer microgrid applications," *IEEE Transactions on Power Electronics*, Vol. 25, No. 1, pp. 1288-1924, Jan, 2010
- [4] X. Chen, Y. H. Wang, and Y. C. Wang, "A novel

seamless transferring control method for microgrid based on master-slave configuration," *ECCE Asia, IEEE Conference*, pp. 351-357, 2013.

- [5] K. T. Tan, X. Y. Peng, P. L. So, Y. C. Chu, and M. Z. Q. Chen,, "Centralized control for parallel operation of distributed generation inverters in microgrids," *IEEE Transactions on Smart Grid*, Vol. 3, No. 4, pp. 1977-1987, Dec. 2012.
- [6] Y. Pei, G. Jiang, X. Yang, and Z. Wang, "Auto-master-slave control technique of parallel inverters in distributed AC power systems and UPS," *IEEE Conference*, pp. 2050-2053, 2004.
- [7] Zhongyi He and Yan Xing, "Distributed control for UPS modules in parallel operation with RMS voltage regulation," *IEEE Transactions on Power Electronics*, Vol. 55, No. 8, pp. 2860-2869, Aug. 2008.
- [8] S. J. Yoon, H. M. Oh, and S. W. Choi, "Controller design and implementation of indirect current control based utility-interactive inverter system," *IEEE Transactions on Power Electronics*, Vol. 28, No. 1, pp. 26-30, Jan. 2013.
- [9] J. Kwon, S. Yoon, and S. Choi, "Indirect current control for seamless transfer of three-phase utility interactive inverters," *IEEE Transactions on Power Electronics*, Vol. 27, No. 2, pp. 773-781, Feb. 2012.



박성열(朴成烈)

1988년 10월 3일생. 2014년 서울과학기술대 전기정보공학과 졸업. 2016년 동 대학원 전기정보공학과 졸업(석사). 2016년~현재 동 대학원 박사과정.



김주하(金周河)

1987년 2월 28일생. 2012년 서울과학기술대 전기정보공학과 졸업. 2014년 동 대학원 전기정보공학과 졸업(석사). 2014년~현재 (주)브이씨텍 연구원.



정아진(鄭雅辰)

1988년 2월 20일생. 2012년 서울과학기술대 제어계측공학과 졸업. 2014년 동 대학원 전기정보공학과 졸업(석사). 2016년~현재 자동차부품연구원 연구원.



최세완(崔世琬)

1963년 3월 3일생. 1985년 인하대 전자공학과 졸업. 1992년 Texas A&M Univ. 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1995년 동 대학원 졸업(공박). 1985년~1990년 대우중공업 중앙연구소 대리. 1996년~1997년 삼성전기 종합연구소 수석연구원. 1997년~현재 서울과학기술대 전기정보공학과 교수. 당 학회 재무이사.