http://dx.doi.org/10.6113/TKPE.2012.17.4.353

UPS 기능을 가지는 배터리 기반의 삼상 전력 평준화 시스템

권정민†

Three-phase Power Equalizing System with UPS Function based on Battery Storage

Jung-Min Kwon†

Abstract - In this paper, three-phase power equalizing system (PES) with UPS function is proposed. This system is based on NiMH battery with battery management system. The power conversion circuit is composed with the three-phase converter/inverter, the bi-directional converter, and the thyristor switches. The three-phase converter/inverter provides the power to the grid or get the power from the grid. Also, it operates as a UPS. The bi-directional converter charges or discharges the battery. The thyristor switches are used for connecting/disconnecting with the grid and the load. A 15 kW prototype is implemented for the verifying the performance of the proposed system.

Keywords: three-phase power equalizing system, uninterruptible power supply, NiMH battery

1. 서 론

2011년 9월 15일 추석연휴가 끝나고 뒤늦게 찾아 온 무더위에 전력사용량이 급증하면서 대한민국 전역에서 초유의 정전사태가 발생했다. 당시 예비전력은 24만kW까지 떨어져, 대한민국 전체를 정전 사태로 내몰 수 있는 '블랙아웃' 상황 직전까지 처했다. 이후에도 원전 고장 등의 이유로 전력수급 불안은 계속되어왔다. 전력 산업 특성상 최대 사용량 기준으로 항상 충분한 전력 예비율을 확보해야 한다. 전력의 수요는 계속 늘어나고 있어, 적정한 전력 예비율을 유지하는 것이 사회적 문제로 대두되고 있다. 전력 예비율을 높이는 방안으로 발전소를 짓는 것도 대안이 될 수 있지만, 발전소를 추가적으로 건설하는 것은 비용뿐만 아니라 환경 문제 등으로 쉽지 않다. 이러한 문제는 전력평준화 시스템을 통해 해결할 수 있다. 전력 평준화 시스템은 잉여 전력을 에너지 저장원에 저장한 후 전력이 부족한 상황에 사용하는 방식이다. 이 시스템은 전력의 활용 효율을 높이고, 전력공급 시스템을 안정화하는 역할을 한다. 특히, 최근 신재생에너지 비중이 높아지면서 전력망제어와 예측에 어려움이 있는데, 전력 평준화 시스템은 신재생에너지원으로 인한 전력 불균형 등의 문제도 해결할 수 있다.

과거부터 사용된 전력 평준화 시스템으로 양수식 수력 발전이 있다. 댐 하류의 저수를 전력의 여유 시에 그 전력을 사용하여 펌프로 양수하고, 전력의 부족 시에 그 물을 유하시켜 발전하는 방식이다. 이 방식은 댐 건설로 인한 환경오염 등의 문제점을 가지고 있다.

최근 다양한 전력 평준화 시스템이 연구되고 있다[1]-[7]. 이차전지의 성능이 비약적으로 발전하고, 2차 전지의 가격도 많이 떨어짐에 따라 배터리를 이용한 전력 평준화 시스템에 대한 연구도 활발히 진행되고 있다.

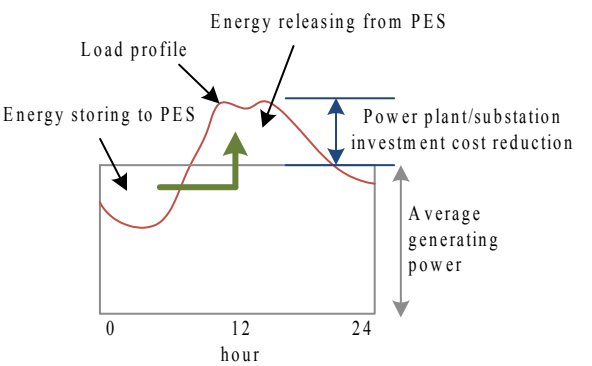


Fig. 1 Power curves of the PES

† Paper number: TKPE-2012-17-4-10 ISSN: 1229-2214
† Corresponding author: jmkwon@hanbat.ac.kr, Dept. of Electrical Engineering, Hanbat National University
Manuscript received Jan. 19, 2012; accepted Jun. 11, 2012

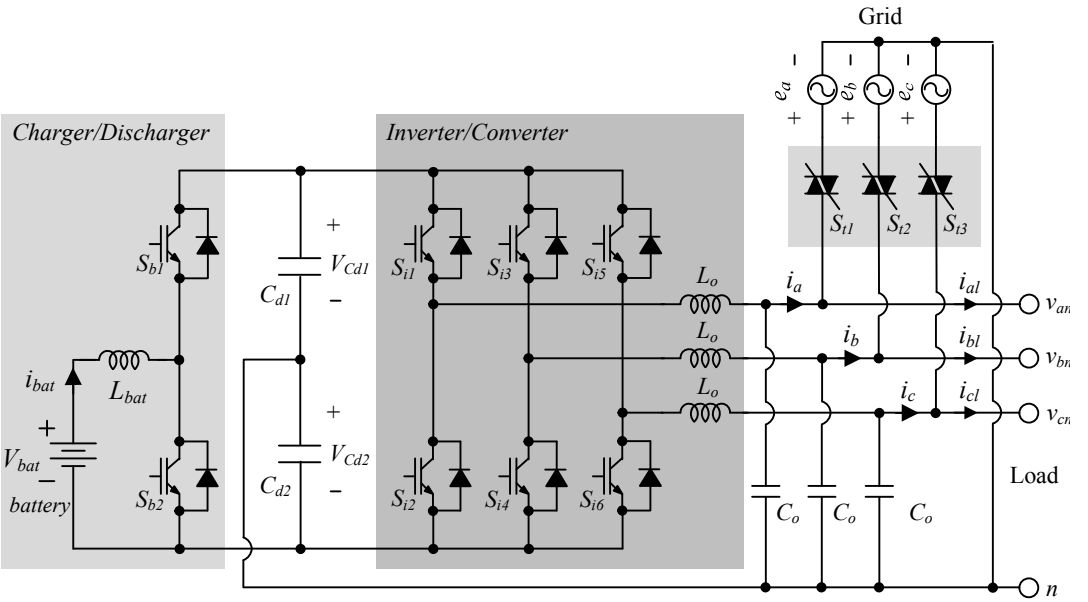


Fig. 2 Power circuit of the proposed system

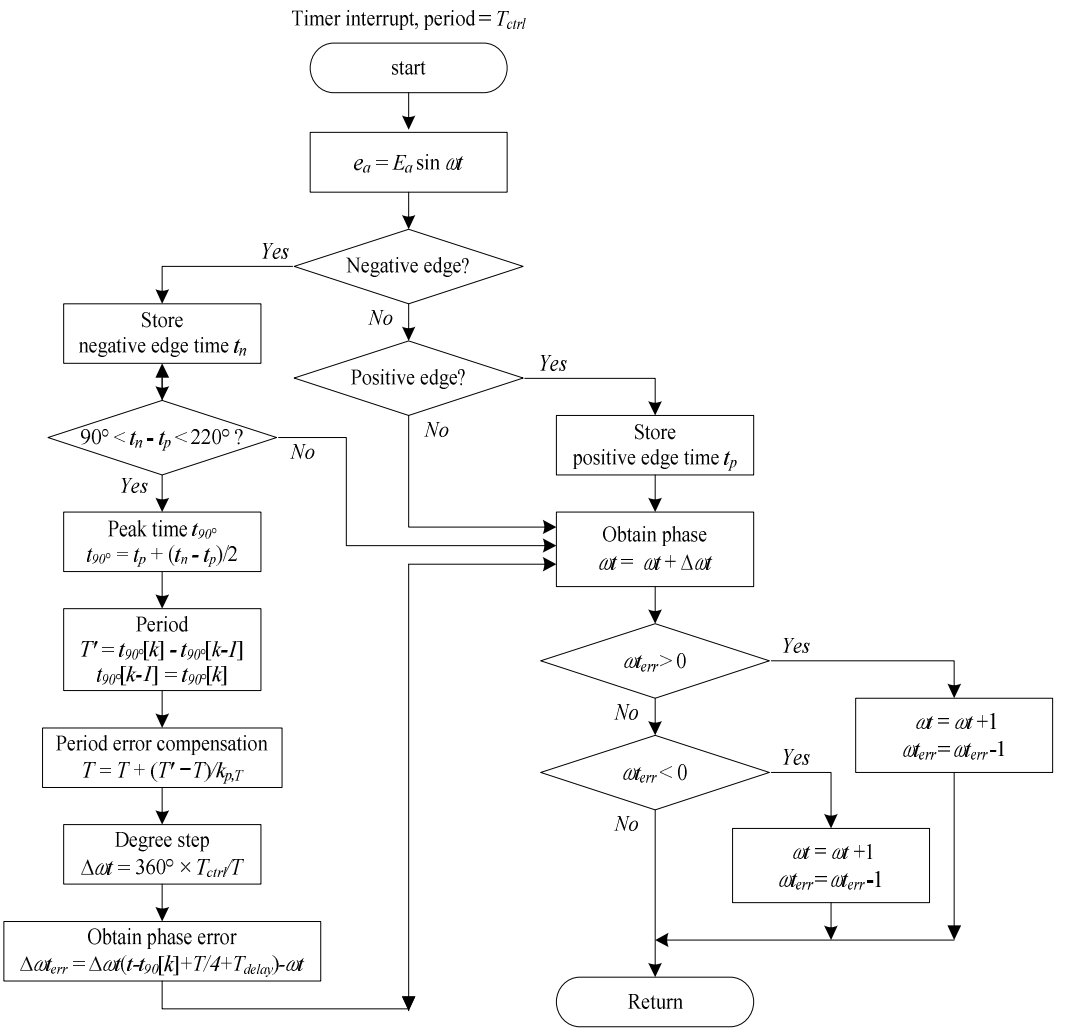


Fig. 3 Flowchart of the PLL for the grid synchronization[11]

배터리를 사용하는 전력 평준화 시스템의 주요 회로 및 부품 구성은 무정전 전원장치의 구성과 유사한 특징을 가지고 있다[8]-[10]. 본 논문에서는 전력 평준화 시스템과 무정전 전원장치의 요구 사항을 모두 만족시키는 시스템 및 제어 알고리즘을 제안하였다.

2. 시스템의 하드웨어 구성

그림 2는 본 논문에서 제안하는 시스템의 전력 변환 회로이다. 제안한 시스템은 BMS를 포함한 배터리 팩과 전력 변환 회로로 구성되어 있으며, 전력 변환 회로는 3상 인버터, 양방향 컨버터, 사이리스터 스위치로 구성된다. 인버터는 계통과 연계되어 운전될 경우 역률을 1을 유지하며 전류 제어 방식으로 제어되며, 이때 사이리스터 스위치는 도통된다. 배터리 방전 시 계통으로 전력을 보내며, 배터리 충전시에는 계통에서 전력을 가져온다. UPS모드로 작동시에는 사이리스터 스위치가 닫혀 계통과 단절되며, 인버터는 전압제어 방식으로 제어된다. 양방향 컨버터는 배터리 충전시 스위치 S_{b2}가 열리고, 스위치 S_{b1}를 스위칭하여 벅 컨버터로 작동한다. 반대로 배터리 방전시는 스위치 S_{b1}이 열리고, 스위치 S_{b2}를 스위칭하여 부스트 컨버터로 작동한다. 제어 보드는 Microchip사의 dsPIC30F6015로 구현하였으며, BMS로부터 배터리팩의 최대 충전 가능 전류와, 최대 방전 가능 전류 데이터를 받는다. 또한 RS232/485 통신을 통해 외부 사용자가 원하는 작동 설정 데이터를 받는다.

3. 시스템의 제어

계통연계 운전시 사이리스터 스위치가 도통되어 계통과 인버터/컨버터와 연결되며, 인버터/컨버터는 역률 1을 유지하며 DC 링크 전압(V_{Cd} = V_{Cd1} + V_{Cd2})이 기준 전압 $V_{Cd,ref}$으로 유지하도록 제어한다. DC링크 전압이 기준 전압 $V_{Cd,ref}$ 보다 낮을 경우 인버터/컨버터는 컨버터로 동작하며, 계통으로부터 역률 1을 유지하며 전력을 DC 링크로 가져오는 역할을 한다. 반대로 DC링크 전압이 기준 전압 $V_{Cd,ref}$ 보다 높을 경우 인터버/컨버터는 인버터로 작동하며, DC 링크에 저장된 전력을 역률 1을 유지하며 계통으로 전력을 보내는 역할을 한다. 그림 3은 제안한 시스템이 계통 연계시 역률 1을 유지하기 위해 사용된 zero crossing edge detection 방식의 Phase Loop Lock (PLL)이다. 전압의 크기가 -에서 +로 바뀌는 시점 t_p과 전압의 크기가 +에서 -로 바뀌는 시점 t_n을 저장하고, 위상이 90도가 시점 $t_{90°}$을 t_p와 t_n의 중간 시점으로 계산한다. 현재의 위상이 90도가 시점 $t_{90°}[k]$과 과거의 위상이 90도가 시점 $t_{90°}[k-1]$을 이용하여 주기 T를 계산한다. 주기 T를 누적시켜 평균화하여 평균 주기 T를 구하여, 이 평균 주기 T를 사용한다. 시스템의

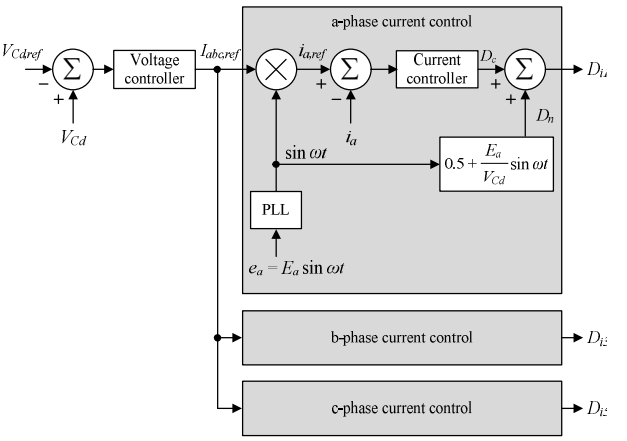


Fig. 4 Control-block diagram of the inverter/converter at the grid connected mode

제어를 위한 시간 인터럽트마다 변하는 위상 차이는 다음과 같이 계산된다.

$$\Delta\omega t = 360^\circ \times \frac{T_{ctrl}}{T} \tag{1}$$

만약 실제 위상과 계산된 위상의 차이가 발생이 될 경우 위상 보정 알고리즘에 의해 위상이 보정이 된다.

그림 4은 계통 연계 운전시의 인버터/컨버터 제어기이다. DC링크 전압제어는 PI 제어기를 통해 제어하였으며, DC 링크의 전압 V_{Cd}이 기준 전압 $V_{Cd,ref}$보다 높을 경우, 계통으로 전력을 보내어 DC 링크의 전압 V_{Cd}을 낮추어 기준 전압 $V_{Cd,ref}$이 되도록 제어한다. 반대로, DC 링크의 전압 V_{Cd}이 기준 전압 $V_{Cd,ref}$보다 낮을 경우 계통으로부터 전력을 가져와서 DC 링크의 전압 V_{Cd}을 높여 기준 전압 $V_{Cd,ref}$이 되도록 제어한다. 계통으로 전력을 내보낼 경우 인버터/컨버터 기준 전류 $I_{abc,ref}$는 양수가 되며, 계통으로부터 전력을 가져올 경우 인버터/컨버터 기준 전류 $I_{abc,ref}$가 음수가 된다. $I_{abc,ref}$는 PLL부터 얻은 sin 값과 곱해져서 인버터의 각 상 기준 전류 $i_{a,ref}$, $i_{b,ref}$, $i_{c,ref}$가된다. 스위칭 주기 T_s 동안의 a상 인덕터 L_o의 전류 변화량 ΔI_a은 다음과 같은 관계식을 가지며

$$\left(\frac{V_d}{2}-e_a\right)D_{i1}+\left(-\frac{V_d}{2}-e_a\right)(1-D_{i1})=L_a\frac{\Delta i_a}{T_s}, \tag{2}$$

스위칭 S_{i1}의 시비율 D_{i1}에 대해 정리를 하면

$$\begin{aligned} D_{i1} &= D_{i,n}+D_{i,c} \\ &= 0.5+\frac{e_a}{V_{Cd}}+\frac{L_o\Delta i_a}{V_{Cd}T_s} \end{aligned} \tag{3}$$

이다. $D_{i1,n}$은 수식으로부터 계산하여 나온 값을 사용한

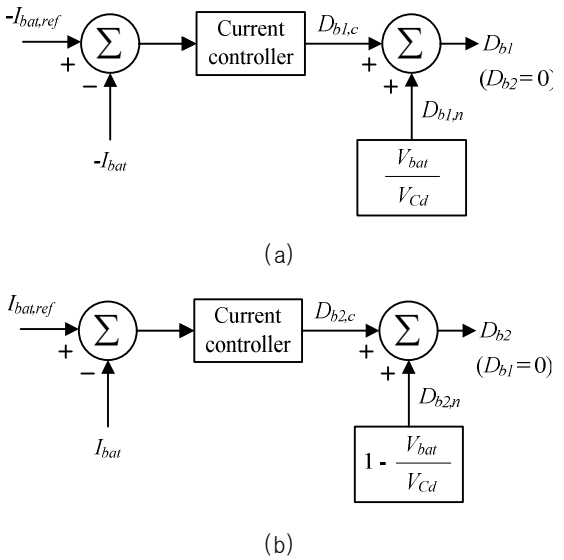


Fig. 5 Control-block diagrams of the battery charger/discharger; (a) Battery charging mode; (b) Battery discharging mode

다. a상의 인버터/컨버터 전류 i_a가 기준 전류 $i_{a,ref}$로 정확히 제어되도록 PI 제어기로 시비율 $D_{i1,c}$를 변화시켜 제어하였다. b상과 c상의 제어 방식은 a상과 동일하므로 설명은 생략한다.

그림 5는 시스템이 계통과 연결되어 있을 때의 배터리 충방전용 양방향 컨버터의 제어기이다. 그림 5(a)는 배터리가 충전될 때의 제어기이다. 배터리 충전시 스위치 S_{b2}는 열려있고 스위치 S_{b1}만 스위칭하여 벅컨버터로 작동한다. 스위칭 주기 T_s 동안의 인덕터 L_{bat}의 전류 변화량 $\triangle I_{bat}$은 다음과 같은 관계식을 가지며

$$V_{bat}(1-D_{b1})-(V_{Cd}-V_{bat})D_{b1}=L_{bat}\frac{\triangle I_{bat}}{T_s}, \quad (3)$$

스위치 S_{b1}의 시비율 D_{b1}에 대해 정리를 하면

$$D_{b1}=D_{b1,n}+D_{b1,c}=\frac{V_{bat}}{V_{Cd}}-\frac{L_{bat}\triangle I_{bat}}{V_{Cd}T_s} \quad (4)$$

이다. $D_{b1,n}=V_{bat}/V_{Cd}$는 벅컨버터의 입출력 시비율과 같다. $D_{b1,c}$는 PI 제어기를 이용하여 충전 전류가 기준 전류 $-I_{bat,ref}$로 유지되도록 하였다. 그림 5(b)는 배터리가 방전될 때의 제어기이다. 배터리 방전시 스위치 S_{b1}는 열려있고 스위치 S_{b2}만 스위칭하여 부스트컨버터로 작동한다. 스위칭 주기 T_s 동안의 인덕터 L_{bat}의 전류 변화량 $\triangle I_{bat}$은 다음과 같은 관계식을 가지며

$$V_{bat}D_{b2}+(V_{bat}-V_{Cd})(1-D_{b2})=L_{bat}\frac{\triangle I_{bat}}{T_s}, \quad (5)$$

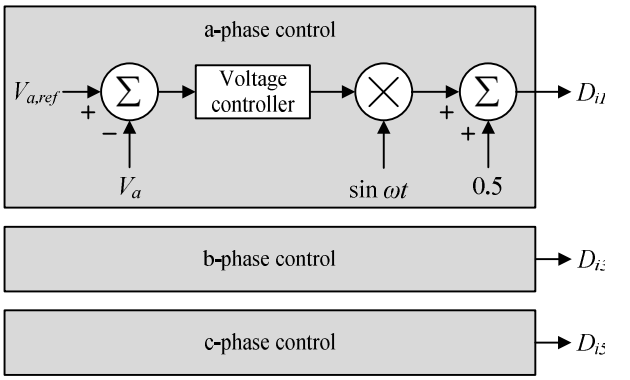


Fig. 6 Control-block diagram of the inverter at UPS mode

Fig. 7 15kW prototype

스위치 S_{b2}의 시비율 D_{b2}에 대해 정리를 하면

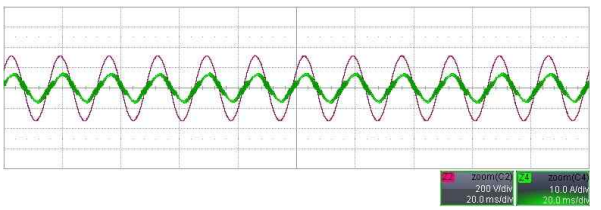
$$D_{b2}=D_{b2,n}+D_{b2,c}=1-\frac{V_{bat}}{V_{Cd}}+\frac{L_{bat}\triangle I_{bat}}{V_{Cd}T_s} \quad (6)$$

이다. $D_{b1,n}=1-V_{bat}/V_{Cd}$는 부스트컨버터의 입출력 시비율과 같다. $D_{b1,c}$는 PI 제어기를 이용하여 충전 전류가 기준 전류 $I_{bat,ref}$ 로 유지되도록 하였다.

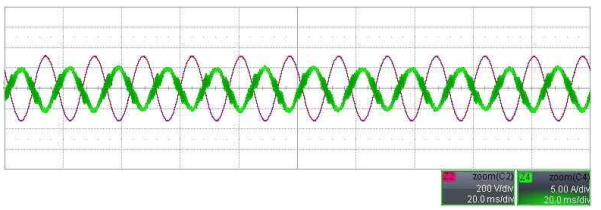
정전시에는 사이리스터 스위치가 단락이 되어 계통과 인버터의 출력이 단절된다. 인버터는 전압제어를 통해 부하에 AC 전력을 공급한다. 이때 출력 전압의 위상은 정전 직전의 PLL의 정보를 이용하여 부하에서 전압의 변동이 없도록 한다. DC 링크의 전압 유지는 배터리 충방전기가 담당한다. 그림 6는 시스템이 UPS 모드로 작동시의 인버터 제어기이다. 각 상은 독립적으로 제어되며, 인버터가 AC 전압을 발생시킬 수 있도록 전압제어 된다. 정전 상황이 종료되어 계통이 정상적인 상황이 될 경우, PLL을 이용하여 전압 제어되고 있는 인버터 전압과 계통의 전압과의 위상이 같아지도록 천천히 조정한다. 그 후 위상이 같아지면 사이리스터 스위치를 도통시키고 인버터는 그림 4의 제어방식을 통해 계통과 연계된다.

Table 1 System parameters

Parameter	Value
Grid	3 phase 380 V
Rated power	15 kW
Switching frequency	15 kHz
Inductor L_{bat}	1 mH
Inductor L_o	1.5 mH
Capacitor C_{d1}, C_{d2}	4700 uF
Capacitor C_o	10 uF
MCU	Microchip dsPIC30F6015



(a)



(b)

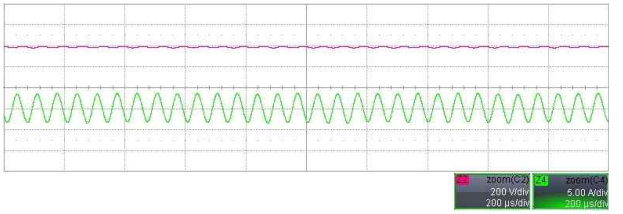
Fig. 8 Inverter/converter voltage v_{an} and current i_a; (a) Battery discharging; (b) Battery charging

4. 실험 결과

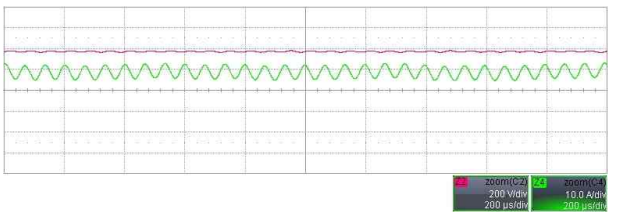
본 논문에서 제안한 UPS 기능을 가지는 삼상 전력 평준화 시스템의 성능 시험을 위해 15kW급 시제품을 구현하였다. UPS 기능을 가지는 삼상 전력 평준화 시스템 시제품의 모습은 그림 7와 같고 주요 파라미터는 표 1과 같다.

그림 8(a)는 인버터가 계통과 연결되고, 배터리가 방전될 때의 a상 전압 v_{an}과 전류 i_a의 파형이다. 정격 전력에서의 역률과 출력 전류 고조파 왜율은 각각 0.99과 2.0%이다. 그림 8(b)는 배터리의 충전을 위해 인버터가 정류기로 작동하며 계통으로부터 전력을 가져올 때의 전압, 전류 파형이다. 계통으로 전력을 보낼 때와 가져올 때, 전류의 방향이 바뀐 것을 볼 수 있다.

그림 9(a)는 배터리 방전시, 양방향 컨버터가 15 kHz 스위칭 주파수로 벅컨버터로 작동시의 배터리의 전압 V_{bat}와 전류 i_{bat} 파형이다. 그림 9(b)는 배터리 충전시, 양방향 컨버터가 15 kHz 스위칭 주파수로 부스트컨버터로 작동시의 배터리의 전압 V_{bat}와 전류 i_{bat} 파형이다. 컨버터의 특성상 스위칭 리플만 보일 뿐, 평균 전류는 일정하게 유지되는 것을 볼 수 있다.

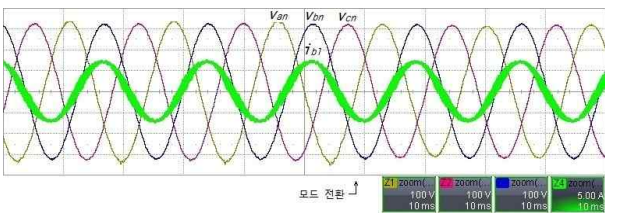


(a)

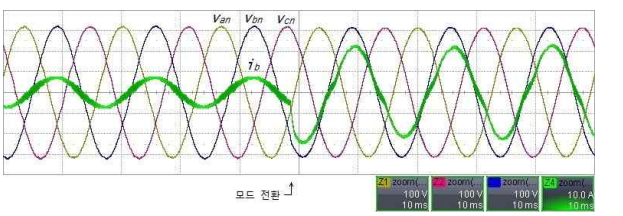


(b)

Fig. 9 Battery voltage V_{bat} and current i_{bat}; (a) Battery discharging; (b) Battery charging



(a)



(b)

Fig. 10 Three phase voltage and current when the mode is changing; (a) voltage v_{an}, v_{bn}, v_{cn} and current i_{bl} when the mode is changed from the grid-connected mode to the UPS mode; (b) voltage v_{an}, v_{bn}, v_{cn} and current i_b when the mode is changed from the UPS mode to the grid-connected mode

그림 10(a)는 인버터가 계통과 연계된 상태에서 정전으로 인해 UPS 동작 모드로 전환될 때의 삼상 전압 v_{an}, v_{bn}, v_{cn} 파형과 저항 부하를 전압 v_{bn}에 연결하였을 때의 부하측 전류 i_{bl}이다. 모드 전환시 전압파형과 부하측 전류 파형이 일그러짐이 전혀 없는 것을 볼 수 있다. 그림 10(b)는 인버터가 UPS 동작 모드로 작동하는 상태

에서 계통 연계된 상태로 전환될 때의 삼상 전압 v_{an}, v_{bn}, v_{cn} 파형과 b상 인덕터 L_o에 흐르는 전류 i_b이다. 모드 전환시 전압은 일그러짐 없는 것을 볼 수 있다. UPS 모드일 때, 전류 i_b는 모두 부하로 흐른다. 이때 인버터는 전압 제어를 하고 있으며, 전류 i_b의 크기는 부하의 영향을 받는다. 계통 연계 동작모드가 되었을 때, 인버터는 전류제어모드로 변경되며, 전류 i_b는 시스템에 설정되어 있는 기준 전류로 변하게 된다. 그림 10(b)의 전류 i_b가 인버터가 전압제어에서 전류제어로 변경되는 것을 보여준다.

5. 결 론

본 논문에서는 UPS 기능을 가지는 삼상 전력 평준화 시스템과 제어 알고리즘을 제안하였다. 15kW급 시제품을 구현하여 검증 하였고, 전력 변환 효율 97%, 출력 전류 고조파 왜율 2.0%, 출력 역률 0.995를 달성하였다. 전력 평준화 시스템이 널리 사용되기 위해서는 전력 수급 상황에 따라 전력 가격이 달라야 한다. 전력 평준화 시스템 설치자는 전력이 쌀 때 전력 에너지를 배터리에 저장하고, 전력이 비쌀 때 전력 에너지를 계통으로 보내줌으로써 경제적 이익을 얻을 수 있어야 한다. 또한, 스마트그리드의 도입으로 전력 평준화 시스템이 전력 수급 상황 정보를 이용할 수 있어야 한다.

이 논문은 2011년도 한밭대학교 교내학술연구비의 지원을 받았음.

참 고 문 헌

[1] D. J. LEE, L. Wang, "Small-Signal Stability Analysis of an Autonomous Hybrid Renewable Energy Power Generation/Energy Storage System Part I: Time-Domain Simulations," *IEEE Trans. on Energy Conversion*, Vol. 23, pp. 311-320, Mar. 2008.

[2] L. Maharjan, S. Inoue, H. Akagi, "A Transformerless Energy Storage System Based on a Cascade Multilevel PWM Converter With Star Configuration," *IEEE Trans. on Industry Applications*, Vol. 44, pp. 1621-1630, Sep./Oct. 2008.

[3] P. Mercier, R. Cherkaoui, A. Oudalov, "Optimizing a Battery Energy Storage System for Frequency Control Application in an Isolated Power System," *IEEE Trans. on Power Systems*, Vol. 24, pp. 1469-1477, Aug. 2009.

[4] M. Subkhan and M. Komori, "New Concept for Flywheel Energy Storage System Using SMB and PMB," *IEEE Trans. on Applied Superconductivity*, Vol. 21, pp. 1485-1488, Jun. 2011.

[5] H. Zhou,T. Bhattacharya, D. Tran, T. S. T. Siew, A. M. Khambadkone, "Composite Energy Storage System Involving Battery and Ultracapacitor With Dynamic Energy Management in Microgrid Applications," *IEEE Trans. on Power Electronics*, Vol. 26, pp. 923-930, Mar. 2011.

[6] J. S. Lee, S. K. Jeong, Y. H. Han, B. J. Park, "Concept of Cold Energy Storage for Superconducting Flywheel Energy Storage System," *IEEE Trans. on Applied Superconductivity*, Vol. 21, pp. 2221-2224, Jun. 2011.

[7] M. Ross R. Hidalgo C. Abbey G. Joós, "Energy storage system scheduling for an isolated microgrid," *IET Renewable Power Generation*, Vol. 5, pp. 117-123, Dec. 2009.

[8] J. K. Park, J. M. Kwon, E. H. Kim, J. K. Kim, B. H. Kwon, "High-Performance Transformerless Online UPS," *IEEE Trans. on Industrial Electronics*, Vol. 55, pp. 2943-2953, Aug. 2008.

[9] E. H. Kim, J. M. Kwon, J. K. Kim, B. H. Kwon, "Practical Control Implementation of a Three- to Single-Phase Online UPS," *IEEE Trans. on Industrial Electronics*, Vol. 55, pp. 2933-2942, Aug. 2008.

[10] E. H. Kim, J. M. Kwon, B. H. Kwon, "Transformerless three-phase on-line UPS with high performance," *IET Power Electronics*, Vol. 2, pp. 103-112, Mar. 2009.

[11] J. M. Kwon, B. H. Kwon, K. H. Nam, "Grid-Connected Photovoltaic Multistring PCS With PV Current Variation Reduction Control," *IEEE Trans. on Industrial Electronics*, Vol. 56, pp. 4381-4388, Nov. 2009.

권정민(權淸緡)

1981년 12월 26일생. 2004년 연세대 전자전기공학과 졸업. 2009년 POSTECH 전기전자공학과 졸업(공박). 삼성전자 종합기술원 전문연구원. 현재 한밭대 전기공학과 조교수.