

단상 UPS 시스템의 모드 전환 시퀀스 및 제어

(Mode Transfer Sequence and Control of Single-phase UPS System)

이상석* · 이순령 · 최봉연 · 이정효 · 원충연**

(Sang-Suk Lee · Soon-Ryung Lee · Bong-Yeon Choi · Jung-Hyo Lee · Chung-Yuen Won)

Abstract

Recently, Uninterruptible power supply(UPS) is spotlighted from concern about black out, due to reserve power problem caused by increased power consumption. When fault occurs on the grid, UPS system supplies power to loads instead of the grid. Also, it is an advantage of possible operation as Energy storage system(ESS). Bi-directional power control of AC/DC Pulse width modulation(PWM) converter is essential for grid-connected UPS system. And, mode transfer control has to be performed considering phase and dynamic characteristic under grid condition. In this paper, control of mode transfer and bi-directional power control of AC/DC PWM converter is proposed for UPS system. Also, it is verified by simulation and experimental results.

Key Words : AC/DC PWM Converter, UPS, ESS, Mode Transfer Sequence, Bi-Directional Power Control

1. 서 론

1.1 연구의 배경

근래에 전 세계적으로 블랙아웃 상황을 대비하는 움직임이 활발히 이루어지고 있는 가운데, 가장 적극적으로 대처할 수 있는 방법으로 무정전 전원장치

(Uninterruptible power supply, UPS) 시스템을 이용하는 방안이 대두되고 있다. UPS 시스템은 블랙아웃 상황 뿐만 아니라 자동화 공장 기기, 병원 등의 부하에 전력품질 향상을 위해 사용되기도 하며, 최근에는 UPS 시스템에 에너지 저장 시스템(Energy storage system, ESS)과 같이 에너지 저장 기능을 가진 연구가 발표되고 있다[1-2].

UPS 시스템은 크게 온-라인(On-line) 방식과 오프-라인(Off-line) 방식으로 나눌 수 있다. 온-라인 방식이란 계통의 전원을 직접 부하로 공급하지 않고 정류부와 인버터를 이용하여 부하에 공급하는 방식으로, 계통의 품질과 무관하게 안정적인 전원의 품질을 보장한다. 이러한 방식은 계통 전압의 전압 순간전압강하나 순간과전압 및 정전 발생 시 별도의 전력 흐름의 절체 없이 빠르게 대처할 수 있다는 장점이 있다. 하

* 주저자 : 성균관대 전자전기컴퓨터공학부 박사과정
** 교신저자 : 성균관대 전자전기컴퓨터공학부 교수
* Main author : Doctor course of Electrical and engineering at sungkyunkwan Univ.
** Corresponding author : Professor of Electrical and engineering at Sungkyunkwan Univ.
Tel : 031-290-4962, Fax :
E-mail : paclss@skku.ac.kr
접수일자 : 2014년 10월 20일
1차심사 : 2014년 10월 22일
심사완료 : 2014년 11월 28일

지만 상시적인 인버터 동작으로 인하여 전체 시스템 효율이 낮다는 단점이 있다. 오프-라인 방식에서는 정상 시 계통이 부하와 UPS 시스템 내의 배터리에 전원을 공급한다. 계통 이상 검출 시, 계통과 부하를 연결하는 스위치가 차단되며 신속히 배터리 내에 저장되었던 에너지를 부하 측에 공급한다. 계통이 안정적인 상황에서는 계통에서 직접 부하로 전력을 공급하기 때문에 인버터를 통해 부하로 전력을 공급하는 온-라인 방식에 비해 효율이 높다는 장점이 있지만, 정전 시 부하와 계통을 연결하는 스위치의 차단시간이 요구되기 때문에 수 ms 동안 부하로 공급되는 전력이 차단될 수 있다.

오프-라인 UPS를 위한 단상 계통 연계형 UPS는 배터리와 양방향 AC/DC 컨버터, 그리고 저주파수 변압기로 구성되어 있다. AC/DC 컨버터는 양방향 컨버터로, 계통 연계 상황에서는 배터리 충전 모드로 동작하여 배터리의 정전류 정전압(constant current constant voltage, CC-CV) 충전을 수행한다. 계통 이상 발생시 UPS 모드로 동작을 전환하고, 계통 연계 모드에서 충전된 배터리를 이용하여 부하에 안정적인 전력을 공급한다. AC/DC 컨버터의 동작은 아래와 같은 그리드 코드를 준수해야 한다 [3-5].

- 무효전력 보상 : 계통의 고조파 감소 및 역률 개선 (IEEE std-1159 및 한전 배전계통 공급기준에 만족하는 역률 0.9이상, THD 5% 이내)
- 유효전력 공급 : 신재생에너지 및 배터리를 이용하여 첨두 부하 및 부하운전 스케줄에 따른 전력 공급을 통한 부하수요관리
- 무정전 전원공급 : 계통 고장 발생 시 부하에 정전압 공급

UPS 시스템은 THD와 역률뿐만 아니라 계통과 UPS와의 연결이 끊어지는 절체시간 및 다시 계통과의 연결이 이루어지는 복전 또한 고려되어야 한다. 만약 절체시간이 길어질 경우 부하에 공급되는 에너지가 일시적으로 중단될 시 부하에 연결된 시스템의 동작이 멈출 수 있다. 또한 UPS 모드에서 계통 연계 모드로 복전할 경우, 계통 측 위상과 부하 측 위상이 동일해야 한다. 만약 계통과 부하 측의 위상이 동일하지

않을 시 계통 사고로 이어질 수 있다는 위험이 있다. 따라서 UPS 시스템은 계통의 위상과 부하 측 위상의 차가 일정 값 이하일 때 복전되어야 안정적인 동작이 가능하다[6-7].

본 논문에서는 4ms 이하의 빠른 절체시간과 복전을 고려한 오프-라인 방식의 300W UPS 시스템을 제안하였다. UPS 시스템의 동작은 계통연계 모드와 UPS 모드로 구분하여 분석을 수행하였다. 계통 연계 모드는 계통 전원을 이용하여 배터리를 충전하는 충전모드와 완충 상태에서 0 전류 제어를 수행하는 Idle 모드로 구성된다. 충전모드 시 정전류 정전압기법을 사용하여 충전을 수행하였으며, Idle 모드는 배터리 완충시 인버터 출력 전류를 0전류로 제어하는 모드이다. 기존 오프-라인 방식과는 달리 배터리 완충시 Idle 모드로 동작하여 계통과 동일한 전압을 공급하게 된다. 따라서 계통 사고에 의한 UPS 절환시 기존 오프-라인 방식에 비해 빠른 UPS 절환이 가능하다. UPS 모드는 출력 전압을 제어하여 부하에 220V_{rms}, 60Hz의 안정적인 전원 공급을 수행한다. 논문에서 사용한 300W UPS 시스템은 시뮬레이션을 통해 UPS 절환 및 복전 운전(mode transfer and power return operation)을 검증하였으며, 이를 바탕으로 한 시뮬레이션과 실험을 통해 300W 단상 UPS 시스템의 동작을 검증하였다.

2. 단상 UPS 시스템

2.1 단상 UPS 시스템의 구성

그림 1은 단상 UPS 시스템이다. 회로는 계통에 연결되어 있는 입력 커패시터, 계통 주파수의 저주파 변압기, H-bridge 인버터 및 배터리로 구성되어 있다. 충, 방전시에는 별도의 인덕터를 연결하지 않고 변압기의 누설 인덕터를 이용하여 전력 변환한다. 이 때 누설인덕터와 출력단 커패시터가 UPS 시스템의 필터 역할을 한다. 배터리는 48V의 납축전지를 사용하였으며, 220V_{rms}의 출력전압을 공급하기 위해 1 : 12 턴수 비를 지닌 변압기를 사용하였다.

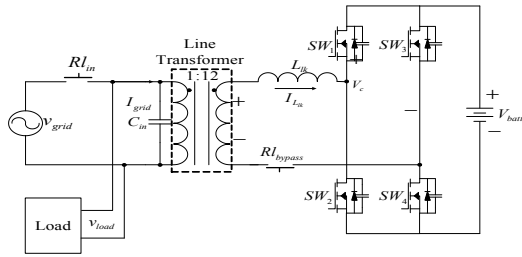


그림 1. 단상 UPS 시스템
Fig. 1. Schematic of single-phase UPS system

2.2 UPS 시스템의 모드 전환 시퀀스

그림 2는 모드 전환 시퀀스이다. 계통 상태에 따라서 충전 모드, UPS모드로 크게 구분된다. 계통이 연결된 상태에서는 계통의 위상과 인버터 출력 위상간의 차이 발생 시 시스템 및 부하에 과전류 등의 문제가 발생하기 때문에, 위상차에 따라서 위상 제어가 수행되며, 계통 측 릴레이가 연결되어 충전모드로 동작한다. 배터리가 연결되지 않았거나 문제 발생 시 바이패스 모드로 동작한다. 또한 계통에 고장 발생하면 UPS 모드로 동작하여 부하 전력제어를 수행한다. 자세한 모드별 동작은 아래서 설명한다.

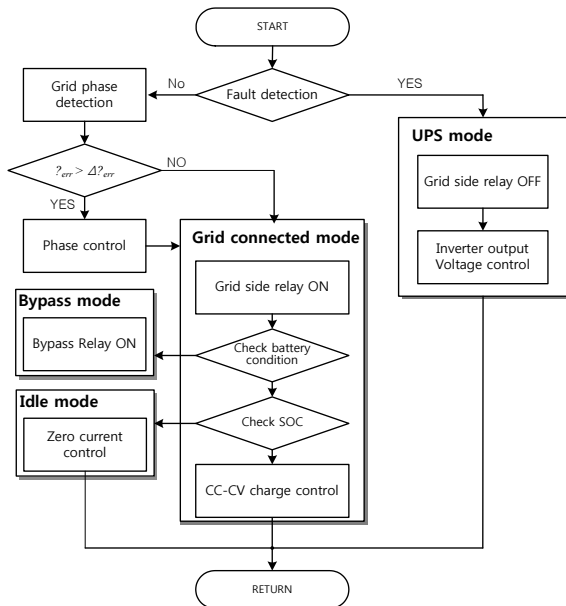


그림 2. 모드 전환 시퀀스용 플로우 차트
Fig. 2. Flow chart for mode transfer sequence

2.3 계통연계 모드 동작

그림 3은 계통연계 모드 동작 시 제어 블록도이다. 계통연계 모드 시에는 릴레이 스위치 R_{Lon} 이 도통되어 계통의 전압이 계통 주파수의 저주파 변압기를 통해 $220V_{rms}$ 를 12 : 1의 권선비로 약 $18V_{rms}$ 로 강압된다. 강압된 전압은 계통 주파수의 저주파 변압기의 누설 인덕터 L_{lk} 를 이용하여 AC/DC PWM 컨버터로 동작하는 H-bridge 인버터를 통하여 배터리에 CC-CV 제어를 통해 정격 48V의 배터리를 충전시킨다. 충전 시에 기존의 방식을 적용할 경우 AC를 DC로 변환하기 때문에, AC 전압이 배터리 전압 보다 낮은 구간에서만 전류가 배터리 쪽으로 전달되기 때문에 효율이 낮다. 따라서 이 문제를 해결하기 위해 3-레벨로 스위칭 하기 위해 바이폴라 방식을 이용하여 배터리로 공급되는 전류를 직류에 가깝게 공급한다. 충전이 완료된 후에는 인버터 출력측 전류의 0전류 제어를 수행하는 Idle mode로 동작하여 계통과 동일한 전압을 공급하기 때문에 UPS 모드 전환시 빠른 전환이 가능하다.

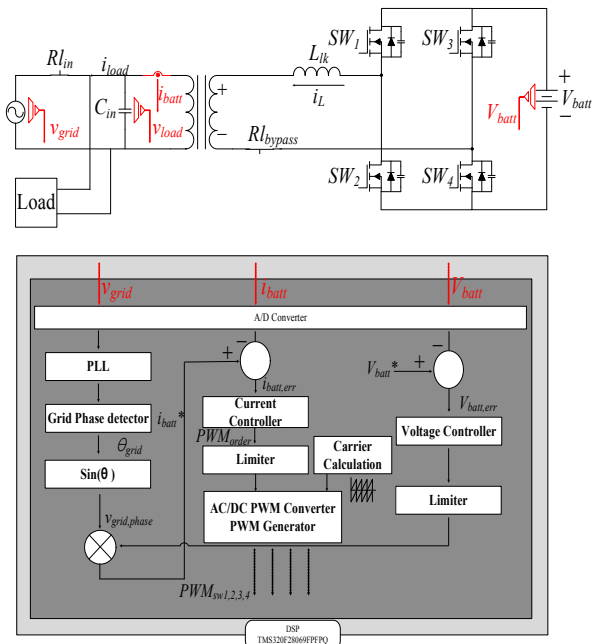


그림 3. 충전 모드 제어 블록도
Fig. 3. Control block for charge mode

2.4 충전 모드 동작

그림 4는 UPS 모드 제어 블록도이다. 계통에 고장 및 정전 발생 시 계통의 1/4주기 내에 UPS 동작 모드로 동작하여 배터리에서 부하에 전력을 공급한다. 계통 고장 및 정전 발생 시 신속하게 릴레이 스위치 RI_{on} 을 이용하여 차단하고 220V_{rms}, 60Hz로 출력 전압을 제어한다. 스위칭 방식은 바이폴라 방식을 이용하여 1개의 반송파와 2개의 기준파를 비교하여 스위칭한다. 계통이 끊어진 상태에서 인버터를 동작하기 위해서, 가상의 위상(θ_{im})을 만들어줄 필요가 있다. 이 위상으로 동작하는 인버터의 출력 파형은 시간이 지남에 따라서 실제 계통의 위상과 차이가 발생한다. 따라서 계통 복구 시, 가상의 위상에 의한 인버터 출력 전압과 계통 전압과의 위상차이가 생기면 과전류 등의 문제가 발생할 우려가 있다. 따라서 위상 제어를 통해 차이가 적을 때 복전해야 한다.

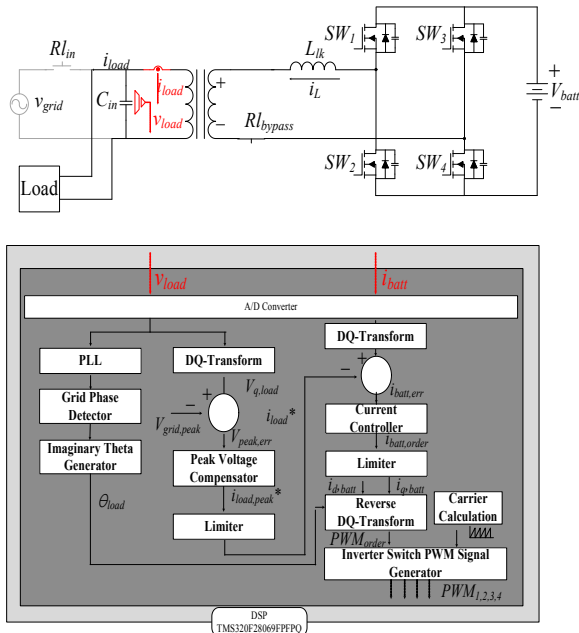


그림 4. UPS 모드 제어 블록도
Fig. 4. Control block for UPS mode

그림 5는 복전 시 위상 제어 블록도 이다. 안전한 복전을 위해서 계통과 인버터 출력 전압 간의 위상을

동기시켜야만 한다.

$$\theta_{err} = \theta_{grid} - \theta_{im} \quad (1)$$

따라서 식 (1)에서 계산된 위상 차이를 보상해주기 위해서 주파수 가변을 통하여 계통의 위상각을 추종한다. 식 (2)와 같이 위상 차 θ_{err} 이 약 5% 이내로 감소할 때까지 인버터 출력 전압의 주파수에 일정한 변화를 통하여 위상 제어를 수행한다.

$$f_{im} = f_{im} \pm \Delta f_{step} \quad (2)$$

계통과 인버터 출력 전압의 위상차가 5% 이내로 감소하면 충전 모드로 복전한다.

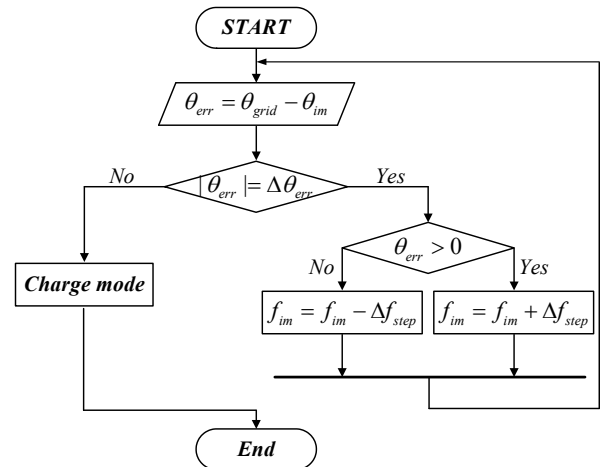


그림 5. 복전 시 위상 제어 플로우 차트
Fig. 5. Phase control flow chart to power return from UPS mode

3. 시뮬레이션 및 실험

3.1 시뮬레이션 결과

그림 6은 기존 오프라인 UPS 시스템의 계통 이상 검출 시 충전 모드에서 UPS 모드로 전환하는 시뮬레이션 결과이다. 기존 오프라인 UPS의 경우 시스템은 계통 사고 시 정지 상태에서 UPS 모드로 전환하기 때문에 안정적인 출력전압을 생성하기까지 시간이 소요

단상 UPS 시스템의 모드 전환 시퀀스 및 제어

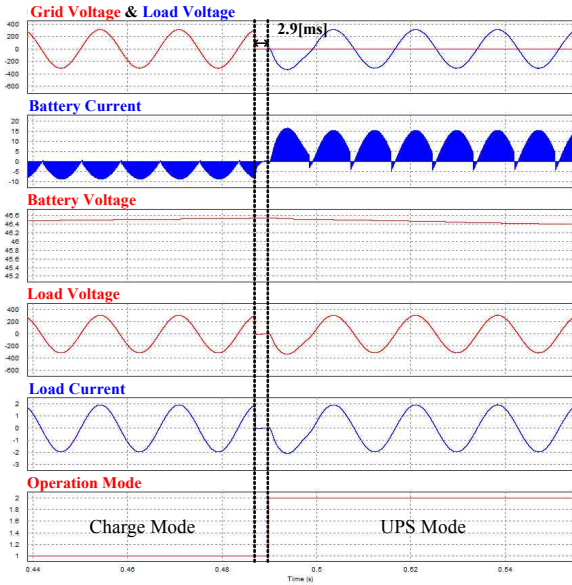


그림 6. 기존 오프라인 UPS 시스템의 계통연계 모드에서 UPS 모드 전환 시뮬레이션 결과
 Fig. 6. Simulation results of mode change to UPS mode from charge mode in conventional off-line UPS system

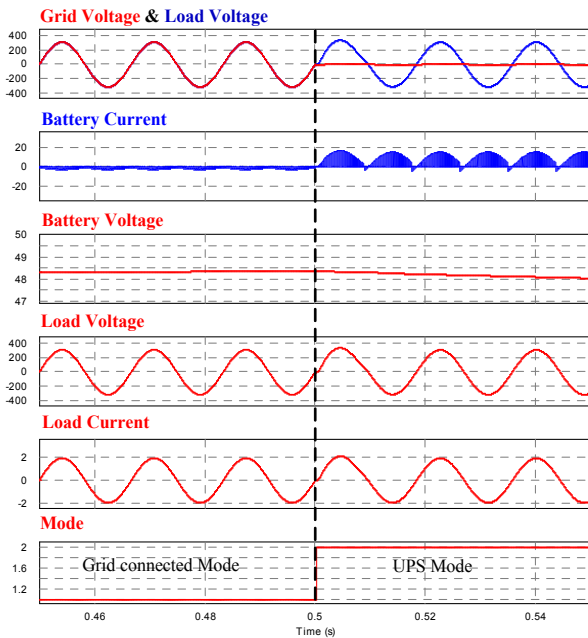


그림 7. 제안된 UPS 시스템의 계통연계 모드에서 UPS 모드 전환 시뮬레이션 결과
 Fig. 7. Simulation results of mode change to UPS mode from charge mode in proposed UPS system

된다. 제안된 UPS 시스템의 경우 배터리 완충 시 0전류 제어를 통해 계통과 동일한 출력전압을 생성하여 그림 7과 같이 계통 사고 시 빠른 전환이 가능하다. 계통연계 모드 시 부하는 계통으로부터 안정적인 전력을 공급받음과 동시에 배터리는 정전류로 충전되어 배터리 전압은 서서히 증가한다. 이 때 AC/DC PWM 컨버터는 CC-CV 제어로 배터리를 충전한다. 계통 전압에 이상 발생 시, UPS는 계통의 약 1/4주기 이내에 계통과의 절체를 수행함과 동시에 부하에 전력을 공급한다. 그림 7과 같이 계통 이상이 발생한 0.5s에서 추가적인 절체시간 없이 안정적으로 UPS 모드로 전환되어 UPS 동작을 수행하는 것을 시뮬레이션 결과를 통해 확인하였다.

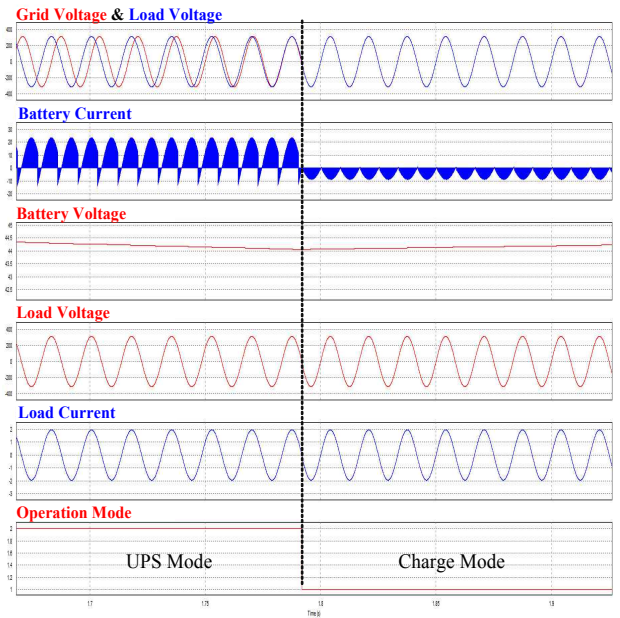


그림 8. 충전 모드 시뮬레이션 결과
 Fig. 8. Simulation results of charge mode

그림 8은 UPS 모드에서 충전 모드로 복귀하는 상황의 시뮬레이션 결과이다. 계통의 사고가 복구되었을 경우, UPS 시스템은 다시 계통과의 연결을 통해 충전 모드로 돌아가야 한다. 계통의 위상과 인버터 출력 전압 사이의 위상차 문제를 해결하기 위해 위상 제어 기법을 적용하였다. 위상차에 의해서 계통이 복구되지만, 바로 충전 모드로 전환되지 않고, 계통의 위상과

인버터의 위상의 차이가 5% 이내가 될 때까지 방전 모드를 유지한다. 위상차가 5% 이내가 되었을 때 계통 측 릴레이를 연결하여 충전모드로 전환하였다. 그림 6의 시뮬레이션 결과를 통해 부하에는 끊임없이 안정적인 전력이 공급됨을 확인하였다.

3.2 실험 결과

실험은 300W 시스템을 제작하여 진행하였다. 실험은 그림 9의 단상 UPS를 이용하여 진행하였다. 입력 측 48V의 배터리 전압일 계통연계를 위해 승압하기 위한 1 : 12 턴수비를 지닌 변압기와 단상 인버터로 구성되어 있다. 배터리는 ATLAS사의 KB100-12 배터리를 4개로 직렬 연결하여 48V로, MCU(Micro controller unit)로는 TMS320F28069를 사용하여 실험하였다. 다른 파라미터는 표 1과 같다.

표 1. 실험 파라미터
Table 1. Experimental parameters

파라미터	값	단위
배터리 전압	48	V
시스템 정격	300	W
변압기 턴수비	1 : 12	
누설 인덕턴스	68	μH
출력 커패시터	270	nF
스위칭 주파수	20	kHz

Line transformer



그림 9. 실험 프로토타입
Fig. 9. Experimental prototype

그림 10은 300W 단상 UPS 시스템의 실험 결과이다. 계통 연계 모드로 시작하여 배터리를 충전하고, 계통에 이상 발생시 Fault 신호가 발생되어, 계통 측 릴레이가 차단되고 UPS 모드로 절환된다. UPS 모드는 인버터가 배터리를 이용하여 부하 측 전압 제어를 수행한다. 실험 결과를 통해 UPS 모드 동작 중 배터리가 방전되며 부하 전압이 계통과 동일한 220V_{rms}, 60Hz로 인가되는 것을 확인하였다. 계통이 복구되면 제안한 위상 제어 기법을 이용하여 계통과 인버터 출력 전압의 위상차가 5% 이내가 되었을 때, 계통 측 릴레이를 연결하고 충전 모드로 절환한다.

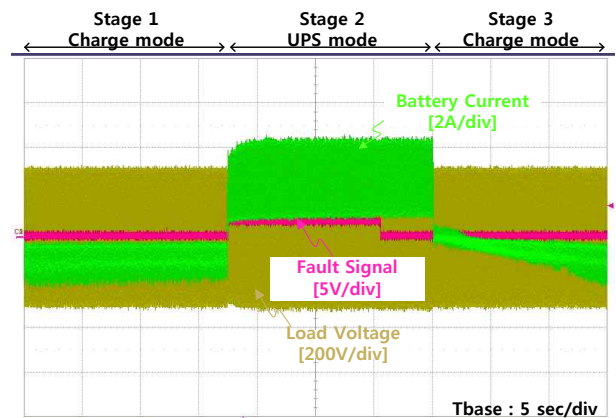


그림 10. 단상 UPS 시스템의 실험 파형
Fig. 10. Experimental results of single-phase UPS system

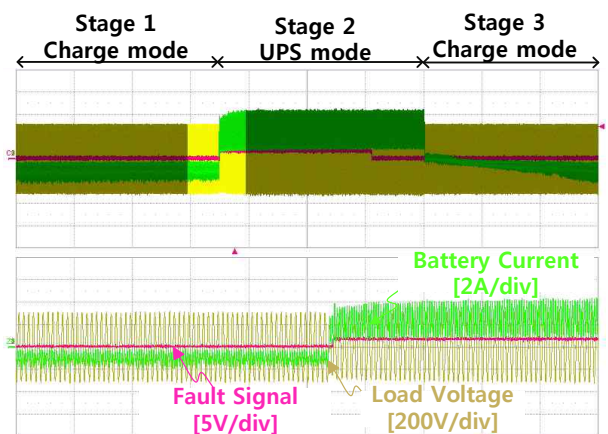


그림 11. UPS 모드 절환 실험 결과
Fig. 11. Experimental results of mode transfer to UPS mode

그림 11은 계통 연계 모드에서 UPS 모드로 전환 시 확대 파형이다. 계통에 이상 발생 시에 계통의 위상을 받아서, 계통에 흐르던 전력과의 위상 차이 없이 4ms 이내에 안정적으로 UPS 모드로 전환하였다.

또한 약 2~3주기 내에 계통과 같은 전압이 부하에 인가되어, 일정 전류로 배터리를 충전하기 위해 흐르던 전류의 방향이 반대로 되어 부하 쪽으로 안정적으로 공급되었다.

그림 12는 충전 모드 복전 실험 결과 파형이다. 계통이 복구되고, MCU에서의 가상 위상으로 동작하는 인버터와 계통전압의 위상차가 발생함에 따라, 시스템의 신뢰성을 위해, 위상 제어를 통해 계통과 인버터 출력 전압 사이의 위상차가 5% 이내가 되도록 제어가 수행하였다. 인버터의 출력 전압과 계통간의 위상차가 5% 이내가 되었을 경우가 되면 계통 측 릴레이를 연결하여 안정적으로 복전되었으며, 부하에는 안정적으로 전력이 공급되었다.

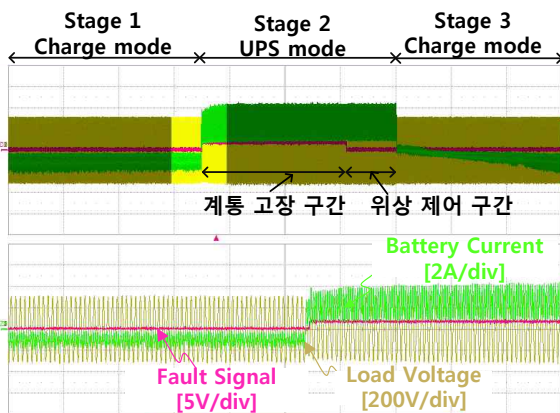


그림 12. 충전 모드 복전 실험 결과
Fig. 12. Experimental results of mode transfer to charge mode

4. 결 론

본 논문에서 단상 UPS 시스템의 모드 전환 시퀀스 및 제어를 제안하였다. 제안하는 모드 전환 시퀀스 및 제어를 통해 계통 이상 발생 시 4ms 내의 절체와 2~3 주기 내에 안정적인 계통과 같은 전력을 부하에 공급한다. 또한 계통 복구 시 복전은 UPS 시스템이 가져

야 하는 기본적인 동작이지만, 복전 시 계통과 인버터 출력 전압 사이의 위상차에 의한 시스템 이상이 발생할 수 있기 때문에 본 논문에서는 5% 이내의 위상차 제어를 통해 안정적인 모드 전환이 가능하다. 배터리를 충전하기 위한 AC/DC PWM 컨버터의 동작뿐만 아니라, 계통의 상황에 따른 모드 전환 시퀀스, UPS 동작은 시뮬레이션 및 실제 시스템의 제작 및 실험을 통해 검증하였다.

이 논문은 2014년도 정부(미래창조과학부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임(No. 2014R1A2A2A05006744).

References

- [1] F. Kamran, Thomas G. Habetler, "A Novel On-Line UPS with Universal Filtering Capabilities", IEEE Trans. Power Electronics, vol. 13, pp. 410 - 418, May 1998.
- [2] I. Kiyokawa, T. Tsujikawa, T. Matsushima, S. Muroyama, "UPS with an electric-energy storage function using VRLA batteries", Telecommunications Energy conference, pp. 808 - 813, Oct. 2003.
- [3] R. Morrison, Michael G. Egan, "A New Power-Factor-Corrected Single-Transformer UPS Design", IEEE Trans. Industry Applications, vol. 36, pp. 171 - 179, February 2000.
- [4] Sung-Hun Ko, Sung-Hun Lim, Su-Won Lee, Seong-Ryong Lee, "Grid-interactive Current Controlled Voltage Source Inverter System with UPS", IEEE Trans, vol. 56, pp. 1064 - 1070, June 2007.
- [5] Je-Hong Kim, "Design of Input-Output Filter of Single Multifunctional UPS", IEEE Trans, vol. 25, pp. 307 - 310, June 2002.
- [6] F. Hassan, R. Critchley, "A Robust PLL for Grid Interactive Voltage Source Converters", IEEE of EPE-PEMC, pp. T2-29 - T2-35, Sept. 2010.
- [7] Amuda, L.N, Silva, S.M, Filho, B.J.C, "PLL Structures for Utility Connected Systems", IEEE of industry Applications conference, vol. 4, pp. 2655 - 2660, Oct. 2001.

◇ 저자소개 ◇



이상석 (李相錫)

1959년 5월 20일생. 1983년 중앙대 전기공학부 졸업. 1986년 동 대학원 전기공학부 졸업(석사). 1997년~현재 박사과정. 1998년~현재 (주)팩테크 대표이사.



이순령 (李盾逞)

1987년 2월 14일생. 2013년 중앙대 전자
전기공학부 졸업. 2013년~현재 성균관대
전자전기컴퓨터공학부 석박사통합과정.



최봉연 (崔棒然)

1987년 11월 16일생. 2012년 한양대 전자
정보시스템공학부 졸업. 2012년~현재
성균관대 전자전기컴퓨터공학부 석박사
통합과정.



이정효 (李禎孝)

1982년 9월 20일생. 2006년 건국대 전기
공학과 졸업. 2008년 성균관대 대학원
전자전기컴퓨터공학과 졸업(석사). 2008
~2013년 성균관대 대학원 전자전기
컴퓨터공학과 졸업(박사). 2013년~현재
LG이노텍 선임연구원.



원충연 (元忠淵)

1955년 5월 10일생. 1978년 성균관대 공대
전기공학과 졸업. 1980년 서울대 공대
대학원 전기공학과 졸업(박사). 1991년
12월~1992년 12월 미국 테네시 주립대학
전기공학과 방문 교수. 1998년~현재 한국
철도기술연구원 심사위원. 2006~2009년
한국전력공사 PQ 심사위원. 2006~2009년 차세대
철도도시철도시스템(한국건설교통기술
평가원) 기술개발사업
운영위원. 2006년~현재 (주)로템 기술자문위원. 2010
~2012년 도시철도공사 기술검증위원. 2007년~현재
삼성전기 에너지파워 연구센터장. 2011~2013년 직류
표준화 연구회 회장. 2010년 전력전자학회 회장. 현재
성균관대 정보통신대학 교수.