

울트라커패시터를 이용한 UPS의 순시전압보상에 관한 연구

(A Study on Instantaneous Voltage Compensation of UPS using an Ultracapacitor)

김지현 · 김수홍 · 김춘삼* · 성원기

(Ji-Heon Kim · Soo-Hong Kim · Choon-Sam Kim · Won-Ki Sung)

요 약

본 논문은 순간전압강하 보상을 위해 축전지와 울트라커패시터가 병렬로 연결된 무정전 전원장치 시스템을 제안하였다. 축전지와 병렬로 연결된 울트라커패시터는 정전시 순간전압강하를 보상하고, 출력전압의 전압 변동률을 감소시키는 역할을 한다. 무정전 전원장치에서 울트라커패시터의 빠른 순간전압보상 구현을 위해 3[kVA]의 시스템을 제작하여 실험을 수행하였다. 실험결과를 통하여 울트라커패시터의 빠른 보상특성과 울트라커패시터를 사용함으로써 출력전압의 변동률이 5[%]이내를 만족함을 확인하였다.

Abstract

This paper proposed UPS system parallel connected in battery and ultracapacitor to compensate instantaneous voltage drop. Ultracapacitor parallel connected with battery compensate instantaneous voltage drop at failure and it's reduced the voltage regulation of output voltage. We are produced for fast instantaneous voltage drop compensation of ultracapacitor at UPS system and experiments are achieved. Experimental result was verified that the ultracapacitor indicated the fast compensation characteristics and regulation of the output voltage satisfied within 5[%] by using ultracapacitor.

Key Words : UPS system, Ultracapacitor

1. 서 론

오늘날 각종 전자기기 산업의 발달로 인해 많은 부분에서 전원장애(전압변동, 임펄스 잡음, 주파수 변동, 고조파 등)가 발생된다. 의료시설, 저장장치, 컴퓨터 시스템, 응급장비, 통신장비, 제어시스템 등

의 장비는 이들 전원장애에 매우 민감해져 순간적인 정전이나 오동작으로 인해 많은 피해가 발생할 수 있다. 또한 이들 정밀기기들은 안정된 전원이 공급 되어져야 하지만 전원측의 전압변동에 영향을 받아 순간 전압강하, 순간정전 및 고조파에 의한 전원의 왜곡현상이 발생한다. 이러한 갑작스러운 장애로 인해 부품의 성능저하 및 시스템의 정지를 유발하기 때문에 전원환경에 민감한 부하시스템에 적용할 수 있는 효율적인 에너지 저장 장치의 필요성이 요구되고 있다. 이러한 문제점들을 극복하기 위해 UPS

* 주저자 : 강원대학교 전기제어공학부 교수
Tel : 033-570-6381, Fax : 033-570-6389
E-mail : jae6090@kangwon.ac.kr
접수일자 : 2005년 12월 2일
1차심사 : 2005년 12월 12일, 2차심사 : 2006년 2월 6일
3차심사 : 2006년 3월 31일, 심사완료 : 2006년 4월 13일

(uninterruptible power supply)시스템의 사용이 대두 되었고, 이들 UPS시스템은 비선형 부하에서 무정전 및 고품질 전력을 제공하는 역할을 수행한다 [1-2].

일반적인 UPS시스템에서 정전시 DC전력 백업을 위해 축전지가 주로 사용되고 있다. 축전지는 비교적 작은 부피와 중량으로 많은 에너지를 저장할 수 있고 여러 용도에서 적당한 출력을 낼 수 있기 때문에 UPS 에너지 저장장치로 널리 이용되고 있다. 그러나 축전지의 수명은 온도 변화, 방전 횟수, 맥동 전류등에 의해 변화되고, 이들 요소의 변화에 따라 정전시 축전지 DC출력전압이 변화된다. 그리고 축전지의 용량 변동과 실제효율(80~95%)에 따른 UPS 시스템의 보상전압변동 및 순간전압 보상지연 등의 단점을 가지고 있다. 이러한 축전지의 단점을 극복하기 위해 수명제한이 거의 없고 효율이 높으며 순간전압보상이 빠른 울트라커패시터가 축전지 및 기타 에너지 저장장치의 대체 및 병용 가능한 장치로 많이 부각되고 있다[3-4].

본 논문에서는 울트라커패시터를 DC전력(축전지)과 병렬로 연결하여 정전시 순간전압강하를 보상하였다. 실험 결과에서 기존 축전지만을 사용한 경우 최대전압 변동율은 ±10[%]이었으나, 울트라커패시터 사용으로 인해 전압 변동율은 정전 발생시 출력전압의 ±5[%] 이내로 감소되고, 순간정전 보상시간은 0.1ms이내임을 확인하였다.

2. 인버터 시스템

2.1 인버터 개요 및 동작 원리

그림 1은 본 논문에서 사용된 ON-LINE방식의 UPS시스템을 보여주고 있다. UPS시스템의 회로구성은 입력단 트랜스포머(Ls), 정류부(Q1, Q4), 인버터부(Q2, Q3, Q5, Q6), 배터리, 울트라커패시터, 출력단 트랜스포머(Lo), bypass용 스위치로 구성되었다[5].

표 1은 UPS시스템의 동작모드를 보여주고 있다. 동작모드는 표에서 보듯이 스위칭 동작에 따라 역률 제어(PFC : power factor control)의 전원단 트랜스

포머 Ls에 에너지를 축적, 방전하는 모드와 인버터의 턴-온, 턴-오프 모드로 분류된다. 또한 역률 제어와 인버터는 독립적인 스위칭 알고리즘을 가지고 있다는 것을 알 수 있다.

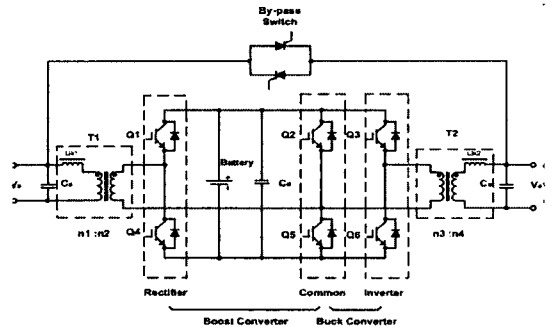


그림 1. UPS 시스템
Fig. 1. UPS system

표 1. 시스템 동작모드
Table 1. System operation mode



Input polarity		PFC	Inverter	
	a	Ls 축적에너지 모드	1 On 모드 2 Off 모드	
	b	Ls 방전에너지 모드	3 On 모드 4 Off 모드	
		c	Ls 축적에너지 모드	5 On 모드 6 Off 모드
		d	Ls 방전에너지 모드	7 On 모드 8 Off 모드

표 1에서 제시된 UPS시스템의 양의 반주기에서 모드는 4개의 모드를 가지고 있으면 모드별 분석은 다음과 같다.

모드 1 : 전원단 트랜스포머 Ls의 에너지 축적 모드와 출력단 인버터의 턴-온 모드로 구분된다. 트랜스포머 Ls의 에너지 축적모드일 경우 스위치 Q4와 스위치 Q5의 다이오드가 턴-온 되어 에너지는 전원단 → Ls → Q4 → Q5 → 전원단의 순서로 흐르게 되어 상용전원으로 트랜스포머에 에너지를 축적하게 된다. 인버터의 턴-온 모드일 경우 스위치 Q3, Q5가 턴-온되고, 울트라커패시터에 충전된 에너지는 울트라

커패시터→Q3→Lo→부하단→Q5→울트라커패시터의 순서로 흐르게 되어 울트라커패시터의 에너지를 부하로 전달함으로써 순시전압강하를 보상한다.

모드 2 : 계속적인 전원단 트랜스포머 Ls의 에너지 축적 모드와 출력단 인버터의 턴-오프 모드로 구분된다. 트랜스포머 Ls의 에너지 축적 모드일 경우 스위치 Q4와 스위치 Q5의 다이오드가 여전히 턴-온 상태이고, 에너지는 전원단→Ls→Q4→Q5→전원단의 순서로 계속적으로 트랜스포머 Ls에 에너지를 축적하게 된다. 인버터 턴-오프 모드 일 경우 스위치 Q5와 스위치 Q6의 다이오드가 턴-온 되고, 출력단 트랜스포머 Lo에 축적된 에너지는 Lo→부하단→Q5→Q6→Lo의 순서로 트랜스포머 Lo에 축적된 에너지를 부하로 방전 한다.

모드 3 : 전원단 트랜스포머 Ls의 방전모드와 출력단 인버터의 턴-온 모드로 구분된다. 트랜스포머 Ls의 방전 모드에서는 스위치 Q1의 다이오드와 스위치 Q5의 다이오드가 턴-온 되고, 에너지는 Ls→Q1→울트라커패시터→Q5→전원단→Ls의 순서로 트랜스포머 Ls는 축적된 에너지를 방전하면서 울트라커패시터에 에너지를 충전한다. 인버터의 턴-온 모드일 경우 스위치 Q1의 다이오드와 스위치 Q3가 턴-온 되고, 에너지는 전원단→Ls→Q1→Q3→Lo→부하단→전원단의 순서가 되어 출력단 트랜스포머 Lo에 에너지를 축적하며 부하에 전력을 공급한다.

모드 4 : 전원단 트랜스포머 Ls의 계속적인 방전 모드와 출력단 인버터의 턴-오프 모드로 구분된다. 트랜스포머 Ls의 방전 모드에서는 스위치 Q1의 다이오드와 스위치 Q5의 다이오드가 턴-온되고, 에너지는 Ls→Q1→울트라커패시터→Q5→전원단→Ls의 순서로 전원단 트랜스포머 Ls는 계속적으로 방전하면서 울트라커패시터에 에너지를 충전하게 된다. 출력단 인버터 턴-오프 모드일 경우 스위치 Q5와 스위치 Q6의 다이오드가 턴-온 되고, 에너지는 Lo→부하단→Q5→Q6→Lo에 순서로 출력단 트랜스포머 Lo에 축적된 에너지를 부하로 방전한다.

2.2 울트라 캐패시터

그림 2는 울트라커패시터의 전기적인 등가모형을

보여주고 있다. 울트라커패시터는 일반적인 커패시터를 이용하여 등가모형을 구성할 수 있다. 그림 2는 울트라커패시터의 1차 모델을 나타내었으며 4개의 이상적인 소자들로 구성되었다. 여기서 R_s 는 등가 직렬저항(ESR)이며 커패시터의 충·방전에 따른 에너지 손실을 야기한다. 병렬저항 R_p 에 의해 커패시터는 자기방전을 하며 이는 흔히 누설전류저항과 같이 주어진다. L은 커패시터의 물리적인 구조에 의한 결과물이며 그 값은 항상 작다. 그러나 고주파 또는 하드스위칭 등과 같은 특별한 동작에서는 이를 무시할 수 없다. 실제적인 커패시터에서 R_p 는 항상 R_s 보다 크다. 따라서 실제적인 고전력 응용에서는 이를 무시할 수 있다. 이 경우 그림 2의 회로모델 임피던스는 $Z = R + j(2\pi fL - 1/2\pi fC)$ 이다.

$2\pi fL - 1/2\pi fC = 0, \quad f = 1/2\pi(LC)^{1/2}$ 이며 임피던스는 순수저항이다. 실제 주파수는 커패시터의 공진 주파수로 주어지며 회로의 임피던스는 단순히 자기공진에서의 저항이다.

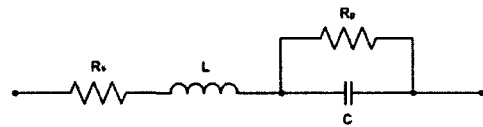


그림 2. 울트라커패시터의 전기적인 등가모형
Fig. 2. Electric equivalent model of an ultracapacitor

실제 울트라커패시터의 전기적 응답을 나타내기 위해 그림 3과 같이 좀 더 일반적인 회로로 표현할 수 있다.

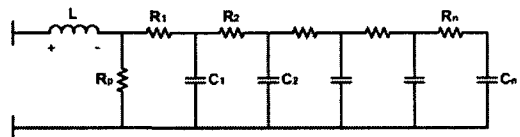


그림 3. 울트라커패시터의 실제적인 등가모형
Fig. 3. The equivalent circuit of an actual untrac-apacitor

또한 울트라커패시터의 DC 충·방전 시간은 AC 전압의 커패시터 $t_{disch} \approx 1/4 f_{ac}$ 의 기본적인 특성주

파수 (f_{AC})와 관련 있다. 그러므로 수초에서 수 십초의 백업 시간에 응용되고, 10[Hz] 보다 낮은 AC신호에 주로 사용된다. 울트라커패시터의 테스트 시 회로모델에 포함되어있는 간단한 RC회로는 중요한 영향을 미치지 않는다.

$Q = CV, E = 1/2 CV^2, V_o - V = iR + (Q_o - Q)/C$ 이며 Q는 커패시터에 충전된 전하의 양, V는 커패시터 전압, E는 커패시터에 충전된 에너지이며 V_o 와 Q_o는 각각 t=0에서의 전압과 전하량을 의미한다. 울트라커패시터가 보조회로로 사용될 때, 울트라커패시터의 용량 결정은 충전지 용량선정과 마찬가지로 1) 출력전력 2) 출력전압 레벨 3) 에너지 용량을 고려해야 된다.

본 실험에 사용된 울트라커패시터의 회로 다이어그램과 충·방전 개요에 의해 정의된 커패시턴스는 그림 4에서 보여주고 있다. 방전은 일정전류 부하장치를 사용하였으며, 1[mA/F]에서 V_1 에서 V_2 까지 전압강하를 위한 시간을 측정하였다. 커패시턴스는 다음과 같은 식으로 나타낼 수 있다[6].

$$C = \frac{i \times (T_2 - T_1)}{V_1 - V_2} (F) \quad (1)$$

여기서 $V_1 = 0.7 \cdot V_R, V_2 = 0.3 \cdot V_R$ (V_R 은 커패시터의 정격전압이다.)

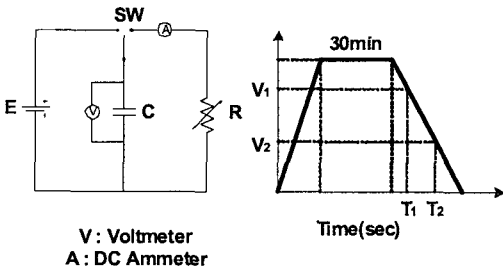


그림 4. 회로 다이어그램과 충·방전 개요에 따라 정의된 커패시턴스
Fig. 4. Circuit diagram and charge/discharge profile to determine capacitance

그리고 그림 5에서는 DC등가 직렬 저항의 측정을

위한 방전테스트 결과를 보여주고 있으며 측정은 다음순서에 따라 수행되었다.

- 1) 충전은 일정한 전압 충전에 따른 일정한 전류에 의해 수행
- 2) 정격전압에 근접한 뒤 전압은 적어도 1분 정도 hold
- 3) 방전전류는 1[mA/F]
- 4) 내부저항은 다음공식으로부터 계산

$$R = \frac{V(V)}{i(A)} (m) \quad (2)$$

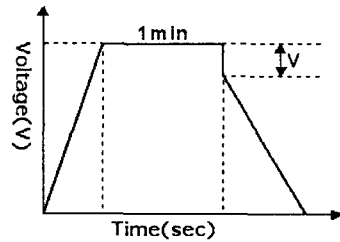


그림 5. DC ESR의 측정을 위한 방전 테스트
Fig. 5. Discharge testing for measuring DC ESR

2.3 시스템 제어알고리즘

그림 6은 인버터의 제어블록 다이어그램을 보여주고 있다. 기준 출력전압 V^* 와 출력전압 V_o 의 오차를 PI제어기 및 피드-포워드 제어기를 통하여 보상해주고, PLL을 통하여 입력 전압의 위상을 고정해주며, 출력 전류의 제어를 통하여 인버터의 스위칭 신호를 발생시킨다.

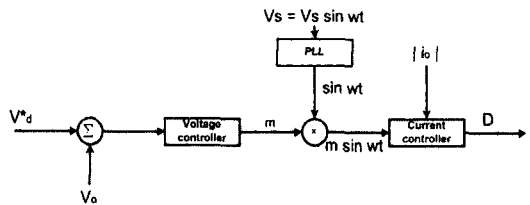


그림 6. 인버터의 제어블록 다이어그램
Fig. 6. Control block diagram of inverter

그림 7은 본 실험에서 사용된 전압 검출기를 보여주고 있다. 입력전압의 일반적인 검출방법은 빠른

울트라커패시터를 이용한 UPS의 순시전압보상에 관한 연구

피크전압을 얻기 위해 phase shifter와 2개의 곱셈기(multiplier)로 구성된 fast detection 기술을 사용한 것이 빠른 최대전압 검출기이다. 이 방식은 입력되는 cos전압 파형을 90[°]이동시켜 sin파형으로 변환하고, 각각의 제곱을 더한 후 간단한 삼각함수이론으로 출력 전압을 검출할 수 있다.

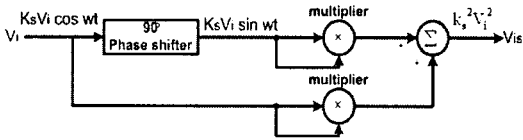


그림 7. 빠른 최대전압 검출기
Fig. 7. Fast peak voltage detector

3. 실험 결과

본 논문에서는 3[kVA]급 UPS를 사용하여 실험을 수행하였으며, 제작된 시스템사양과 실험에 사용된 파라미터는 표 2에 나타내었다. 시스템의 출력전력과 전압레벨을 고려할 때, 울트라커패시터의 용량은 UPS시스템의 구동범위 내에 있어야 한다. 따라서 인버터 DC전력 보상 시스템인 울트라커패시터와 축전지의 용량 선정은 울트라 커패시터의 경우 셀당 최대 전압을 고려하여 NESSCAP(2.7[V]/100[F]) 85개(약 230[V])로 설계하였다.

표 2. 시스템 파라미터
Table 2. Experiment parameter

전 력	3[kVA]
출력전압	220[Vac]
출력전류	13.6[A]
스위칭주파수	15[kHz]
트랜스포머	1차측 : 90[mH]-200turn(n1,n4) 2차측 : 45[mH]-100turn(n2,n3)
인버터 스위치	IGBT-FMG2G100US60 (Fairchild-600[V], 100[A])
Bypass SCR	MCC 95Module
마이크로프로세서	80C196

커패시터의 전하량은 $\Delta Q = i_d \times \Delta T_{\max}$ 이며, 정전 시간 ΔT_{\max} 동안 직류전압의 변동크기는 최대

$V_{dover} - V_{dunder}$ 까지이므로 울트라커패시터의 정전용량은 $C_d = 4Q / (V_{dover} - V_{dunder})$ 로 결정되며 25[%]의 여유마진을 두어 용량을 설정하였다. 축전지의 용량 선택의 경우 셀당 최대 출력 8[V]를 고려하여 28개(약 224[V])로 구성되었다. 그림 7은 실험에 사용된 DC전력 보상 시스템을 보여주고 있다. 7(a)는 축전지 회로, 7(b)는 울트라커패시터 회로를 보여준다.

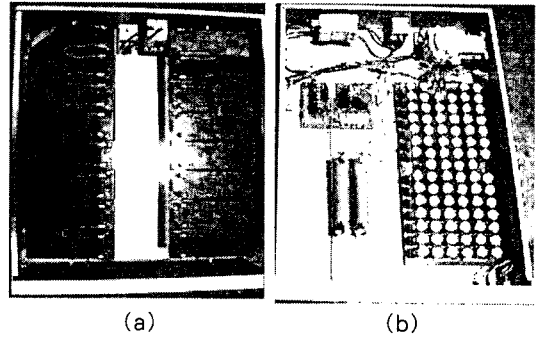


그림 7. DC전력 보상 시스템
(a)축전지 회로 (b)울트라커패시터 회로
Fig. 7. DC power compensation system
(a)Battery circuit (b)Ultracapacitor circuit

4. 실험 결과

본 장에서는 논문에서 제시된 UPS시스템의 각부 실험 결과를 보여 준다. 그림 8은 UPS시스템의 정상상태시 입력과 출력전압 및 울트라커패시터의 출력전압을 보여주고 있다. 인버터 출력전압은 최대값(V_{peak})을 보여주며, 전원전압 출력파형은 실효값(V_{rms})을 측정하였다. 그림 9는 정전상태(약 2.3s)시 3[kVA]의 풀부하에서 측정하였다. 출력전압 변동율은 정상상태와 정전시의 출력파형을 비교해 볼 때, 5[%]미만임을 확인하였다.

그림 10은 정전시점에서의 출력파형을 보여주고 있다. 전원전압의 정전시점에서 울트라커패시터는 순간전압 보상을 위해 방전을 시작하고 이 방전전압에 의해 정전시 출력전압이 보상되는 것을 알 수 있다. 그림 11은 전원전압이 정상 시점으로 복귀될 때의 출력파형을 보여주고 있다. 울트라커패시터 출력은 정전시 방전한 후 다시 충전되는 것을 보여준다.

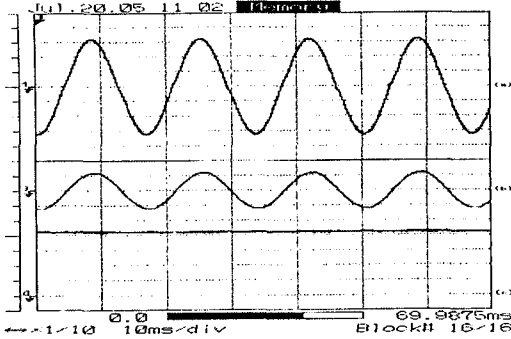


그림 8. 정상시 시스템의 출력파형
 (a)인버터 출력전압 V_{peak} (100(V/div))
 (b) 전원전압 V_{rms} (200(V/div))
 (c)울트라커패시터 전압(50(V/div))
 Fig. 8. Output waveforms of system at normal operation
 (a) Inverter output voltage(V_{peak} 100(V/div))
 (b) Source voltage(V_{rms} 200(V/div))
 (c) Ultracapacitor voltage(50(V/div))

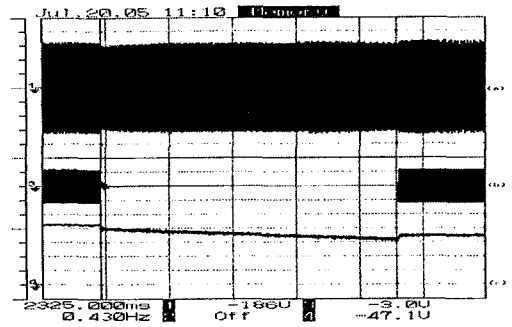


그림 9. 정전시 시스템의 출력파형
 (a)인버터 출력전압 V_{peak} (100(V/div))
 (b) 전원전압 V_{rms} (200(V/div))
 (c)울트라커패시터 전압(50(V/div))
 Fig. 9. Output waveforms of system at failure operation
 (a) Inverter output voltage(V_{peak} 100(V/div))
 (b) Source voltage(V_{rms} 200(V/div))
 (c) Ultracapacitor voltage(50(V/div))

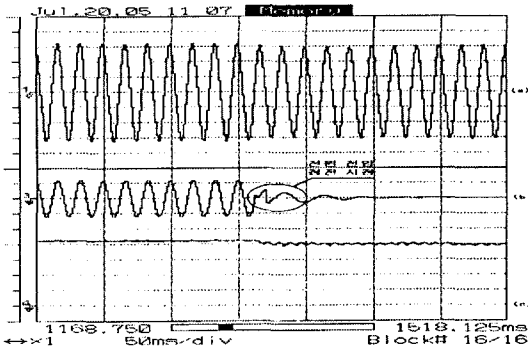


그림 10. 정전시점에서 시스템의 출력파형
 (a)인버터 출력전압 V_{peak} (100(V/div))
 (b) 전원전압 V_{rms} (200(V/div))
 (c)울트라커패시터 전압(50(V/div))
 Fig. 10. Output waveforms of system at failure operation starting point
 (a) Inverter output voltage(V_{peak} 100(V/div))
 (b) Source voltage(V_{rms} 200(V/div))
 (c) Ultracapacitor voltage(50(V/div))

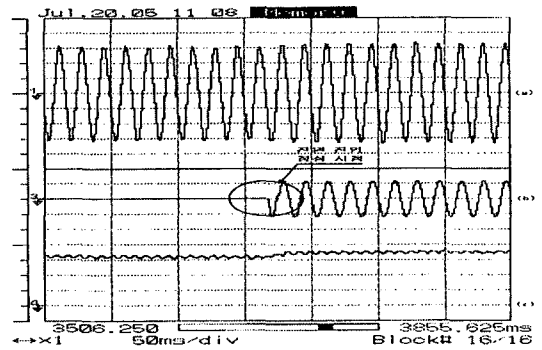


그림 11. 정상 복귀시점에서 시스템의 출력파형
 (a)인버터 출력전압 V_{peak} (100(V/div))
 (b) 전원전압 V_{rms} (200(V/div))
 (c)울트라커패시터 전압(50(V/div))
 Fig. 11. Output waveforms of system at failure operation return point
 (a) Inverter output voltage(V_{peak} 100(V/div))
 (b) Source voltage(V_{rms} 200(V/div))
 (c) Ultracapacitor voltage(50(V/div))

그림 12는 풀부하에서 정상상태일 경우 전원전압과 전류파형을 보여주고 있다. 전원전압과 전류는 실험파형을 통하여 동상을 이루는 것을 확인 할 수 있으며 전원단 시스템의 역할은 실험결과를 통하여

0.98~1 사이임을 알 수 있다.

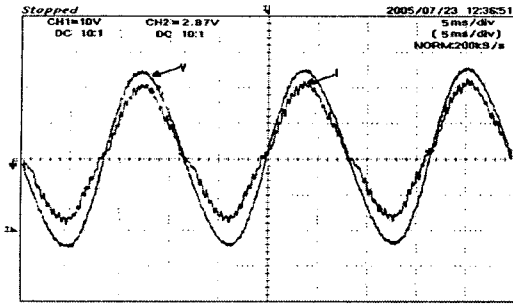


그림 12. 정상상태인 경우 전원 전압과 전류 파형(full-load)

Fig. 12. Source voltage(V) and current(I) waveforms at steady-state(full-load)

5. 결 론

본 논문에서는 UPS 시스템의 순간 전압강하 보상을 위하여 DC전력과 울트라커패시터를 병렬로 연결한 시스템을 제시하였다. 울트라커패시터가 저장할 수 있는 에너지는 축전지보다 작지만 특성상 잦은 충·방전이 용이하여 반복사용이 가능하다. 또한 아주 짧은 시간 동안의 순시첨두치 전력을 공급할 수 있는 능력이 축전지의 10~100배 이상이다. 그리고 수초에서 수 시간 또는 수 일간 에너지를 저장하고 있다가 큰 전력이 필요한 경우 에너지를 공급할 수 있다. 또한 울트라커패시터를 축전지와 조합하여 사용함으로써 최대출력을 울트라커패시터가 담당하여 축전지에 부과되는 과도한 스트레스인 증부하 방전을 완화시킴으로써 에너지저장 시스템의 출력특성이 향상되고, 순간전압 보상능력이 우수 하다는 것을 실험 결과를 통해 알 수 있었다.

References

- [1] Je-Hong Kim, Jae-Ho Choi, "Active Power Filter Type Uninterruptible Power Supply(UPS)", Journal of the Korea Instituted of Illuminating and Electrical Installation Engineers, 1229-4691, Vol.12 No.4, pp.100-105, 1998.
- [2] Young-Bok Byun, Sung-Jun Park, Yonug-Bae Choo, Soon-Jae Kown, Cheul-U-Kim, "A Study On the Distortion Reducing of Output Voltage for UPS by Estimated Load Current", Journal of the Korea Instituted of Illuminating and Electrical Installation Engineers, 1229-4691, Vol.2 No.6, pp.69-77, 1998.
- [3] Spillance, D, O' Sullivan, D, Egan, M, G, Hayes, J, G, "Supervisory control of a HV integrated starter-alternator

with ultracapacitor support within the 42V automotive electrical system", APEC 2003, Vol. 2, pp.1111~1117.

- [4] Woo-jin choi, Hee-jong jeon, "Design of the Fuel Cell Powered Line-Interactive UPS System", Journal of the Korea Instituted of Illuminating and Electrical Installation Engineers, 1229-4691, Vol.18, No.6, pp.205-212, 2004.
- [5] Bong-Hwan Kwon, Jin-Ha Choi, Tae-Won Kim, "Improved single-phase line-interactive UPS", Industrial Electronics IEEE Transactions, Vol. 48, Issue. 4, 2001, pp.804~811.
- [6] NESSCap Co., Ltd, "NESSCAP ULTRACAPACITOR TECHNICAL GUIDE", NESSCap 2003, pp.1~9.

◆ 저자소개 ◆

김지현 (金志憲)

1979년 9월 23일생. 2004년 삼척대학교 컴퓨터제어계측공학과 졸업. 2006년 동 대학원 컴퓨터제어계측공학과 졸업(석사).

김수홍 (金洙弘)

1976년 8월 11일생. 2002년 삼척대학교 제어계측공학과 졸업. 2004년 중앙대학교 일반 대학원 졸업(석사). 현재 동 대학원 박사과정.

김춘삼 (金春杉)

1960년 11월12일생. 1984년 동아대 전기공학과 졸업. 1988년 중앙대 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1993년 동 대학원 전기공학과 졸업(박사). 2002~2001년 미국 오하이오 Akron 대학 전기공학과 방문교수. 1994년~현재 강원대학교 전기제어공학부 교수.

성원기 (成源基)

1956년 2월 9일생. 1980년 중앙대 전자공학과 졸업. 1982년 동 대학원 전자공학과 졸업(석사). 1987년 동 대학원 전자공학과 졸업(박사). 1986년~현재 강원대학교 전자정보통신공학부 교수.