

전력회수 능력을 갖는 전압원 컨버터-인버터 세트로 구성된 부하모의장치

배병열, 한병문
명지대학교

Load Simulator with Power-Recovery Capability Based on Voltage Source Converter-Inverter Set

B.Y. Bae, B.M. Han
Myongji University

ABSTRACT

This paper describes a load simulator with power-recovery capability, which is based on the voltage source converter-inverter set. The load simulator described in this paper can save the electric energy that should be consumed to test the operation and performance of the distributed generation system and the power quality compensator. The load simulator consists of a converter-inverter set with a DSP controller for system control and PWM pulse generation. The converter operates as a universal load to model the linear load and the non-linear load, while the inverter feed the energy back to the power source with harmonic compensation. The load simulator can be widely used in the lab to test the performance of the distributed generation system and the power quality compensator.

1. 서론

최근 대체에너지와 전력품질에 관한 관심이 높아지면서 분산전원 연계장치와 전력품질 보상장치에 관한 다양한 연구가 진행되고 있다. 새로 개발된 분산전원 연계장치나 전력품질 보상장치를 실험실에서 효과적으로 성능 분석을 하기 위해서는 이들 장치의 출력단자에 시험용 부하를 연결하여 시험한다. 통상 이 시험용 부하는 피 시험장치의 용량에 맞게 선형부하는 저항, 리액터, 그리고 커패시터를 조합하여 제작하고 비선형부하는 다이오드나 싸이리스터 정류기에 저항, 리액터 그리고 커패시터를 조합하여 제작한다.

그런데 현재 사용되고 있는 시험용 부하는 피 시험 장치의 정격용량에 해당하는 전력을 시험용 부하의 저항에서 열에너지로 소모하는 방식으로 에너지 절감 측면에서 대단히 비효율적이다. 또한 제작 상 편의를 위해 선형부하와 비선형부하를 별개의 장치로 만들어 사용하여 실험실 공간을 많이 차지하고, 실험 시 필요에 따라 선형부하와 비선형부하의 연결과 해체를 반복해야 한다.

시험용 부하의 이러한 단점을 개선하고자 고안된 것이 부하모의장치이다.^[1] 부하모의장치는 단일기기로 선형부하와 비선형부하의 특성을 모의할 수 있고, 부하에서 소모되는 전기에너지를 회수한 후 전원 측으로 공급하여 에너지절감을 갖는다. 초창기에 개발된 부하모의장치는 대용량 아날로그증폭기를 사용하여 가격이 고가이고 부하의 최대용량에도 제약이 있었다.

본 연구에서는 전압원 컨버터와 인버터로 구성된 새로운 부하모의 장치를 제안하고 그 성능을 PSCAD/EMTDC 소프트웨어에 의한 시뮬레이션과 하드웨어 시제품에 의한 실험으로 검증한다. 제안하는 모의부하장치는 시스템손실에 해당하는 전력만 소모하고 나머지 에너지는 모두 전원으로 회생가능하고 또한 전원 측에 흐르는 무효전류와 고조파의 보상도 가능하여 대용량부하를 모의하는데 대단히 용이하다.

2. 제안하는 시스템

그림 1은 제안하는 부하모의장치의 전력회로도를 나타낸 것이다. 제안하는 시스템은 3상 전압원 컨버터와 인버터를 기반으로 구성되어 있는데, 컨버터는 선형과 비선형 부하의 특성을 모의하는데 활용되고 인버터는 컨버터가 직류링크 단에 흡수한 에너지를 전원 측으로 회수하는데 활용된다.

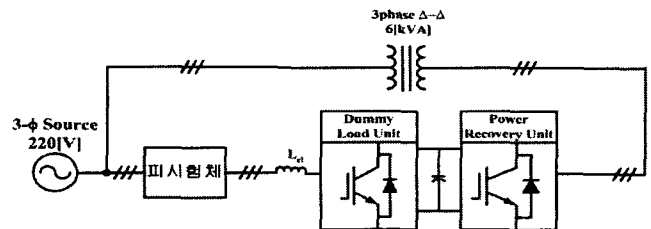


그림 1 제안하는 부하모의장치

본 논문에서는 편의상 부하모의를 위해 피시험체와 직접 연결되는 컨버터를 가상부하기(Dummy Load Unit)라 명명하고, 3상 변압기를 통해 전원과 연결되는 인버터를 전력회수기(Power Recovery Unit)라 명명한다. 가상부하기는 전류제어기를 통해 선형과 비선형부하의 전류특성

을 가능한 정확하게 모의하도록 동작하며, 전력회수기는 가상부하기가 흡수한 에너지를 전원 측에 회수함과 동시에 전원 연결점에서 발생하는 고조파와 무효전력을 보상하는 기능을 갖는다. 따라서 전력회수기의 출력은 순환 고조파전류를 제거하기 위해 delta-delta 결선 변압기를 통해 전원에 연결되고 전자와 동일한 전류제어기로 출력 전류를 제어한다.

3. 제어시스템 설계

일반적인 3상 인버터가 전력계통과 연결된 등가회로를 간단히 표현하면 그림 2와 같다. 여기서, 연결점의 전압 V_T 는 평형이고 주파수가 60Hz인 평형 3상 전압이라 가정한다.

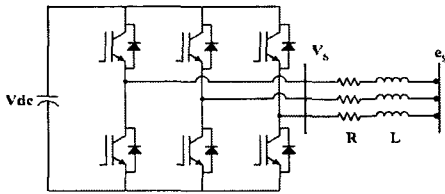


그림 2 인버터와 계통의 연계등가회로

그림 2를 기본으로 하여 3상 전압 방정식을 동기좌표계로 변환하여 정리하면 식 (1)과 같다.

$$V_{ds}^c = R i_{ds}^c + L \frac{di_{ds}^c}{dt} - \omega L i_{qs}^c + E_{ds}^s$$

$$V_{qs}^c = R i_{qs}^c + L \frac{di_{qs}^c}{dt} + \omega L i_{ds}^c + E_{qs}^s \quad (1)$$

전개된 식 (1)을 이용하여 제어기를 구성하면 그림 3과 같이 나타낼 수 있다.

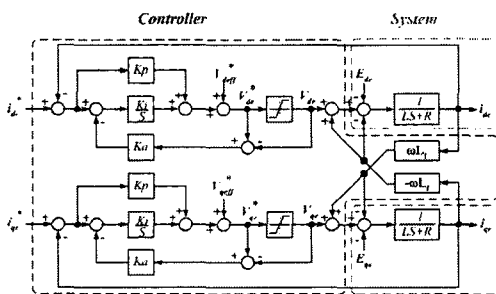


그림 3 3상 대칭회로에 대한 전류제어기

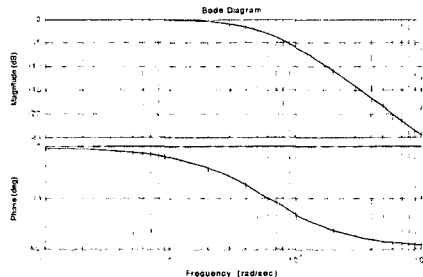


그림 4 bandwidth=6000[rad/sec]일 때 전달함수의 bode선도

그림 3에 구성된 제어기의 파라미터를 설정하기 위해서는 시스템의 스위칭주파수, 리액턴스, 그리고 저항 등의 파라미터를 알아야 하며 이를 이용하여 시스템의 성능 및 안정성을 최대한 보장 할 수 있는 대역폭(bandwidth)을 결정하여야 한다. 이 시스템에서는 6000 [rad/sec]로 대역폭을 설정하였으며 이 때 제어기 전달함수의 보드(Bode)선도는 그림 4에 나타낸 것과 같다.

이상에서 설명한 전류제어기를 바탕으로 부하모의장치의 전체제어기를 기능별로 구성하면 그림 5와 같다.

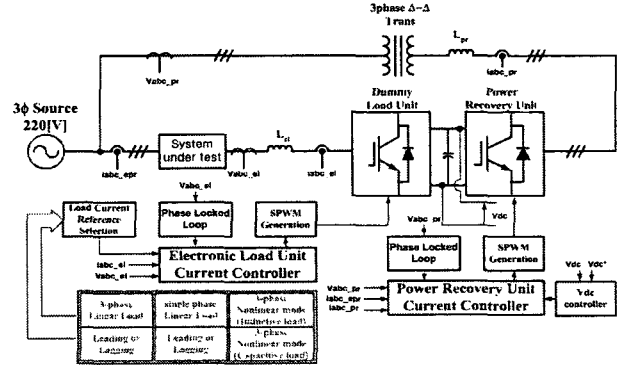


그림 5 부하모의장치의 전체제어기

전체제어기는 크게 가상부하기의 전류제어기와 전력회수기의 전류제어기로 구분된다. 부하모의기의 전류제어기는 피시험체의 출력전압과 전류를 검출하여 이 값을 입력으로 사용하여 모드선택기에서 지정한 부하전류의 파형을 형성한다.

부하전류제어기는 조작자가 지령하는 부하형태로 전류 제어를 수행하는데 크게 선형부하와 비선형부하로 나누

표 1 모드별 부하설정 방법

	부하모드	모드설정방식
1	3상 평형 선형부하	피상전력, 역률, 그리고 진·지상 설정
2	선간 단상 선형부하	피상전력, 역률, 그리고 진·지상 설정
3	3상 다이오드 정류기 비선형 용량성 부하	상 전류 최대값 설정
4	3상 다이오드 정류기 비선형 유도성 부하	상 전류 최대값 설정

어 동작하고 표 1에 기술한 바와 같이 선형부하는 다시 3상평형부하와 선간단상부하로 구분되고 비선형부하는 직류 측에 리액터가 직렬로 결합된 유도성 부하와 직류 측에 커패시터가 병렬로 결합된 용량성 부하로 구분된다.

이상의 부하모드에서 제어기의 밴드폭(bandwidth)을 고려해야할 모드는 3과 4에 해당된다. 3과 4의 경우 기본파뿐만 아니라 5, 7차, 11, 13차, 그리고 17, 19차 고조파의 크기와 위상지연 특성을 고려해야 실제 다이오드 정류기의 비선형 특성의 구현이 가능하다. 이것은 그림 4에 보인 제어기의 주파수 특성에 기인하는 각 고조파의 위상지연 값을 알고 있으므로 각 고조파별 위상지연을 미리 보상함으로써 위상지연이 없이 기준 값과 동일한 출력전류를 형성할 수 있다. 그림 6은 이와 같이 비선형 부하에서 전류제어기에 공급되는 입력기준신호에 고조파

별 위상지연을 고려하는 블록도를 나타낸 것이다.

한편 제한하는 부하모드제어기는 총 4가지 형태의 부하모드가 가능하나 이들 각각의 조합도 가능하여 단일 부하뿐만 아니라 혼합된 부하의 모의도 가능하다.

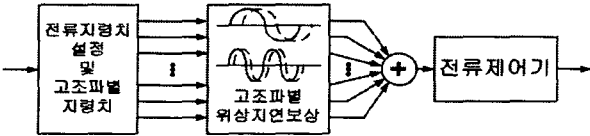


그림 6 고조파 위상지연 보상

전력회수기의 전류제어기는 전원전압, 회수기의 출력 전류, 피시험체의 입력전류를 검출하여 입력으로 사용하고 직류링크전압을 일정하게 유지하면서 전원으로 공급되는 전류를 제어한다. 이 제어기의 주요 역할은 가상부하기에서 흡수한 전력을 전원으로 희생하도록 출력전류를 제어하는 것이다. 이 제어기는 원활한 전류제어를 수행하기 위해 DC 링크전압을 일정하게 유지하는 직류전압제어기를 포함하고 있다. 전압제어기 출력 기준 전류에 Dummy Load Unit의 기본과 유효전류를 합하여 전류제어기의 입력을 형성하도록 하였다.

피시험체가 연결되는 전원 단은 최적화된 최소의 전력만 흘러야한다. 이를 위해서는 유효전력을 제외한 무효전력, 그리고 고조파 전류를 최대한 경감시켜야 그 목적을 달성할 수 있다. 이를 위해 전원 무효전류 및 고조파 검출기 등을 구성하여 전력회수기의 전류제어기에 넣어 줌으로써 전원단의 무효전류 성분과 고조파전류를 통합적으로 보상하게 된다. 이것은 무효전력 보상기능이 포함된 능동전력필터의 기능과 같다.

4. 시뮬레이션

본 연구에서는 부하모의장치의 동작과 성능을 분석하기 위해 계통연계 전력전자 기기 해석에 유용한 프로그램인 PSCAD/EMTDC(Power System Computer Aided Design

표 2 시뮬레이션 파라미터

시스템 정격 용량	20[kVA]
전원전압	380[V]
인버터용량	30[kVA]
3상 delta-delta Trans. 용량	30[kVA]
DC-Link 전압	700[V]

/Electro Magnetic Transients DC Analysis Program)을 이용하여 시뮬레이션을 수행하였다. 시뮬레이션을 위해 전력회로와 제어기 전체에 대해 모델링을 실시하였다. 표 2는 시뮬레이션에 사용된 전력회로의 파라미터를 나타낸 것이다.

본 시뮬레이션에서는 실제 하드웨어시스템의 동작과 유사한 특성을 얻기 위해 Digital 제어기에서 사용되는 Sample & Holder 및 지연기 등을 사용하여 모의하였다. 따라서 Digital 시스템에서의 1 sample 지연과 인버터 PWM 변조에 따른 0.5 sample 지연 등을 고려하여 시뮬레이션 모형을 구현하였다.

시뮬레이션은 시스템의 부분 및 전체 성능을 확인하기

위해 각 모드별 동작을 나누어 모의하였다. 3상평형 선형부하로 동작하기 위해서 Power Factor인 $\cos\theta$ 값을 설정하여 역률을 결정하고, 부하 전력의 조절에 의해서 순 저항 부하가 되도록 했으며 Lead or Lag를 설정하여 진상 및 지상부하 역할을 수행 하도록 하였다. 표 3은 3상평형 선형부하의 시뮬레이션을 위한 시나리오를 나타낸 것이다.

표 3 평형 선형부하 시뮬레이션 시나리오

시간[sec]	0.2~0.25	0.25~0.3	0.3~0.35	0.35~0.4
용량 및 역률	10[kVA], PF = 1.0	20[kVA] PF = 1.0	20[kVA] PF = 0.8 (지상)	20[kVA] PF = 0.8 (진상)

이 시나리오에 의하면 0.2-0.25초 사이에서는 부하용량을 10kVA로 그리고 역률은 1.0으로 유지하고 0.25-0.3 초 사이에서는 부하용량을 20kVA로 증가하여 유지한다. 또한 0.3-0.35 초 사이에서는 20kVA로 유지하고 역률은 지상 0.8로 유지한다. 마지막으로 0.35-0.4 초 사이에서는 역률을 진상 0.8로 유지하였다.

그림 7은 시뮬레이션 결과를 나타낸 것이다. 상단 그림은 부하용량과 역률 변동에 따른 무효전력의 변화를 나타낸 것이고 하단 그림은 이때 각 상의 전류 변화를 나타낸 것이다.

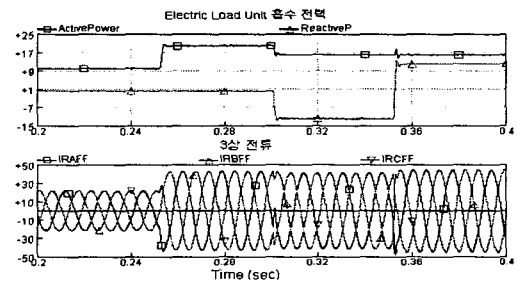


그림 7 3상평형 선형부하

선간단상 선형부하의 동작을 모의하기 위해 부하모의기는 동기화 된 θ 에 대하여 기준 상에 대한 나머지 상들의 θ 보정이 필요하며 기준 $\sin\theta$ 에 대한 크기를 설정해야 한다. 그렇기 때문에 이러한 보상을 하는 제어블록이 필요하다. 더불어 피상전력 및 역률을 설정하여 선간단상 선형부하가 될 수 있도록 시뮬레이션 하여야 한다. 표 4는 선간단상 선형부하의 시뮬레이션을 위한 시나리오를 나타낸 것이다.

표 4 선간단상 선형부하 시뮬레이션 시나리오

시간[sec]	0.2~0.25	0.25~0.3	0.3~0.35	0.35~0.4
용량 및 역률	5[kVA], PF = 1.0	10[kVA] PF = 1.0	10[kVA] PF = 0.8 (지상)	10[kVA] PF = 0.8 (진상)

이 시나리오에 의하면 0.2-0.25초 사이에서는 부하용량을 5kVA로 그리고 역률은 1.0으로 유지하고 0.25-0.3 초 사이에서는 부하용량을 10kVA로 증가 유지한다. 또한 0.3-0.35 초 사이에서는 10kVA로 유지하고 역률은 지상 0.8로 유지한다. 마지막으로 0.35-0.4 초 사이에서는 역률

을 진상 0.8로 유지하였다.

그림 8은 시뮬레이션 결과를 나타낸 것이다. 상단 그림은 부하용량과 역률 변동에 따른 유효전력의 변화를 나타낸 것이고 하단 그림은 이때 각 상의 전류 변화를 나타낸 것이다.

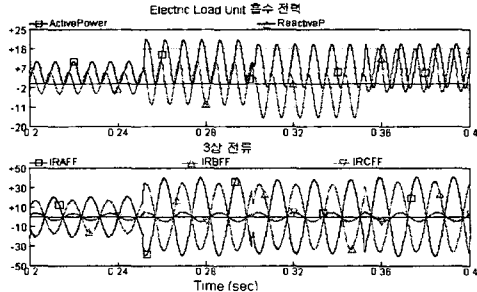
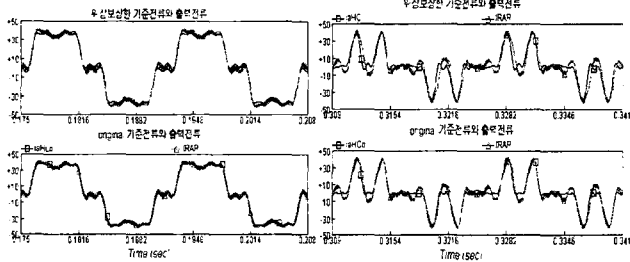


그림 8 선간단상 선형부하

3상 다이오드정류기의 유도성부하는 각 고조파 차수별로 크기와 위상을 설정하여 가상부하에서 해당 고조파를 발생하였다. 이는 저항부하와 리액터가 연결되어 있을 때 발생하는 고조파 함유율을 분석하여 전류 피크값으로 크기를 설정하고 기본파에 대한 위상차를 설정하였



(a) 유도성 부하 (b) 용량성 부하

그림 9 3상 다이오드정류기의 유도성 부하와 용량성 부하

다. 그림 9 (a)는 3상 다이오드 정류기의 유도성 부하에서 기준전류와 출력전류를 나타낸 것이다. 상단은 고조파 위상보상 전 기준전류와 출력전류를 나타낸 것이고 하단은 고조파 위상보상 후 기준전류와 출력전류를 나타낸 것이다. 하단의 결과가 우수함을 알 수 있다.

3상 다이오드정류기의 용량성 부하는 각 고조파 차수별로 크기와 위상을 설정하여 가상부하에서 해당 고조파를 발생하였다. 이는 저항부하와 커패시터가 연결되어 있을 때 발생하는 고조파 함유율을 분석하여 전류피크값으로 크기를 설정하고 기본파에 대한 위상차를 설정하였다. 그림 10 (b)는 3상 다이오드 정류기의 용량성 부하에서 기준전류와 출력전류를 나타낸 것이다. 상단은 고조파 위상보상 전 기준전류와 출력전류를 나타낸 것이고 하단은 고조파 위상보상 후 기준전류와 출력전류를 나타낸 것이다. 하단의 결과가 우수함을 알 수 있다.

5. 시작품 제작 및 실험

제안하는 PWM 인버터식 부하모의장치의 하드웨어적인 동작을 검증하기 위해 6kVA 용량의 프로토타입을 제작하고 실험을 통한 성능분석을 실시하였다. 그림 11

은 제작된 프로토타입의 하드웨어사진을 나타내고 있다. 제작된 프로토타입의 정격용량은 6kVA 이고 기타 회로요소의 파라미터는 표 5와 같다.



그림 10 Electronic Load 하드웨어 시스템

표 5 시스템 파라미터

시스템 용량	6[kVA]
정격전압	220[V]
인버터 용량	15[kVA]
3상 delta-delta Trans. 용량 및 leakage L	10[kVA], 0.2[mH]
Power Recovery Unit 리액터	2[mH]
Electronic Load Unit 리액터	2[mH]
DC-Link 전압	450[V]

전체 시스템을 제어하는 메인 프로세서로는 TI사의 DSP(TMS320vc33)로 구성하였다.

시작품의 실험은 시뮬레이션에서 실시한 분석과 동일하게 제안하는 시스템의 하드웨어적 구현 타당성 검증을 위해 각 동작모드에 대해 실시하였다.

3상평형 선형부하를 시험하기 위해 부하 용량을 6[kVA]로 설정하고 과도 응답을 살펴보기 위해 역률을 지상 0.8에서 진상으로 Step 가변을 수행하였다. 실험결과는 그림 12에 나타낸 것처럼 시뮬레이션에서 얻은 결과와 동일한 형태로 됨을 알 수 있다. 또한 각 상의 전류응답특성이 전원전압을 기준으로 빠르게 수행됨을 알 수 있고 지상에서 진상모드로 전환 시 과도응답이 원활하게 이루어지는 것을 알 수 있다.

선간단상 선형부하는 전원전압을 기준으로 각각의 상 전류를 단상의 형태로 만들어 줘야 하기 때문에 시뮬레이션에서처럼 B상과 C상의 전류의 합이 A상과 합해졌을 때 0이 되어야 한다. 이는 전원전압을 기준으로 했을

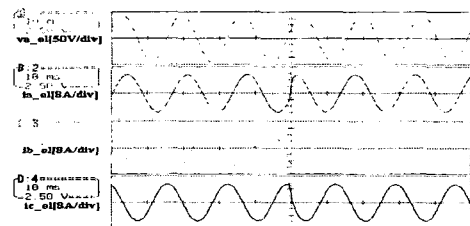
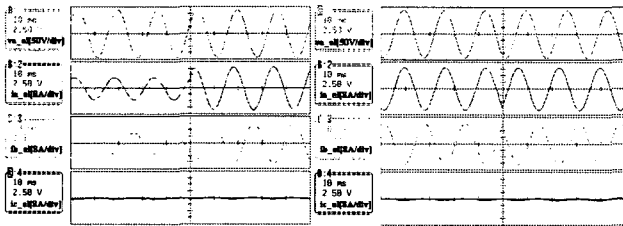


그림 11 3상평형 선형부하(6kVA 지상0.8 → 진상0.8)

때 A상의 전류를 정 방향으로 봤을 때 B상은 역 방향이 되도록 하여야 선간단상 선형 부하로 동작한다. 시뮬레이션 결과와 같이 실험 결과에서도 이러한 형태로 되어짐을

확인하고 또한 선간단상 선형부하에서 피상전력 및 역률 설정을 통해서 진상 및 지상의 부하 동작을 확인하였다.

그림 13은 역률을 1로 유지하고 부하의 용량을 2kVA에서 4kVA로 스텝변화를 했을 때 전원전압과 각 상의 전류를 나타낸 것이다. 스텝변화 시 과도현상은 거의 무시할 정도로 작음을 알 수 있다. 그리고 그림 14는 부하 용량은 4kVA로 유지하면서 역률을 지상 0.8에서 진상 0.8로 스텝전환 할 때 부하모의기의 응답특성을 나타낸 것이다. 이 경우도 스텝변화 시 과도현상은 거의 무시할 정도로 작음을 알 수 있다.



(a) PF=1, 2kVA→4kVA (b) 4kVA, 지상0.8 → 진상0.8
그림 12 선간단상 선형부하

3상 다이오드정류기의 유도성 부하는 가상부하기에서 유도성 부하가 갖는 전류의 고조파를 발생하여야 한다. 따라서 관련된 각 고조파의 차수, 크기, 위상지연을 설정해야 한다. 그렇기 때문에 본 실험에서는 저항과 리액터로 되어있는 유도성 부하의 고조파 함유율을 분석한 데이터 값을 토대로 가상부하기에서 고조파를 발생하도록 하였다.

그림 15는 실험을 통해 얻은 3상 다이오드 정류기의 유도성 부하에서 기준전류와 출력전류를 나타낸 것이다. 상단은 고조파 위상지연을 보상하기 전 기준전류와 출력전류를 나타낸 것이고 하단은 고조파 위상지연을 보상한 후 기준전류와 출력전류를 나타낸 것이다. 고조파 위상 지연보상에 의해 기준전류와 출력전류가 위상지연 없이 일치하는 것을 알 수 있다.

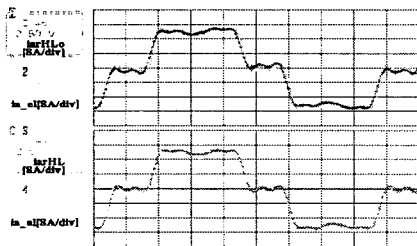


그림 13 3상 다이오드정류기의 유도성 부하

3상 다이오드 정류기의 용량성 부하에서도 부하모의기가 용량성 부하가 갖는 전류의 고조파를 발생하여야 한다. 따라서 유도성 부하와 마찬가지로 각 고조파의 종류, 크기, 위상지연 등을 설정해야 한다. 본 실험에서는 저항과 커패시터로 되어있는 용량성 부하의 고조파 함유율을 분석한 데이터 값을 토대로 부하모의기에서 고조파를 발생하도록 하였다.

그림 16은 실험을 통해 얻은 3상 다이오드 정류기의 유도성 부하에서 기준전류와 출력전류를 나타낸 것이다. 상단은 고조파 위상지연을 보상하기 전 기준전류와 출력전류를 나타낸 것이고 하단은 고조파 위상지연을 보상한

후 기준전류와 출력전류를 나타낸 것이다. 그림 15와 마찬가지로 위상지연 보상에 의해 출력 특성이 우수함을 알 수 있다.

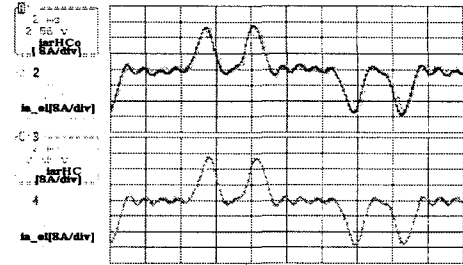


그림 14 3상 다이오드정류기의 용량성 부하

6. 결 론

본 논문에서는 새로 개발된 분산전원 연계장치나 전력 품질 보상장치의 성능을 실험실에서 효과적으로 분석하기 위해 필요한 새로운 부하모의장치를 제안하였다. 제안하는 부하모의장치는 2대의 PWM 인버터가 직류 단을 공유한 구조로 선형과 비선형부하를 단일기기로 시험 가능하도록 설계되어 있다.

본 논문에서는 제안하는 시스템의 동작과 성능을 검증할 목적으로 PSCAD/EMTDC 소프트웨어를 이용하여 시뮬레이션 실시하였고 또한 하드웨어구현 타당성을 검증할 목적으로 6kVA 용량의 프로토타입을 제작하여 실험을 실시하였다. 시뮬레이션과 프로토타입 실험결과 제안하는 부하모의장치는 3상평형 선형부하와 선간단상 선형부하 뿐만 아니라 3상 다이오드정류기의 유도성 및 용량성 부하도 효과적으로 모의가 가능함을 알 수 있었다.

감사의 글

본 연구는 과학기술부 및 한국과학재단의 ERC프로그램을 통한 지원으로 이루어졌으며 이에 감사를 드립니다.

참 고 문 헌

- [1] H. Akagi, Y. Kanazawa and A. Nabae, "Generalized Theory of the Instantaneous Reactive Power in Three-Phase Circuits" Int. Conf. Power Electronics, Tokyo, 1983, pp. 1375~1386
- [2] Malesani, L., Rossetto, L., and Tenti, P, "Active Filter for reactive power and harmonics compensation", IEEE Power Electron. Spec. Conf. Rec., pp. 321~330, 1996
- [3] L. Moran, P. Godoy, R. Wallace, J.Dixon, "A New Current Control Strategy for Active Power Filters Using Three PWM Voltage Source Inverters", IEEE, PESC, pp. 3~9, 1993
- [4] Ando, I, Takahashi, I, Tanaka, Y, Ikehara, M, " Electric load controlled by computer simulator having power regeneration ability ", IEEE Power Conversion Conf, vol. 2, pp. 925-930, 1997
- [5] Guan-Chyun Hsieh, Jung-Chien Li, " Design and implementation of an AC active load simulator circuit ", IEEE Trans. Aerospace and Electronic Systems, vol 29, pp. 157-165, 1993