

능동전력필터와 전력회수 능력이 있는 부하모의장치의 연계시험 분석

최준영, 이두영, 이동근, 배병열, 한병문
명지대학교

Interconnection analysis of active power filter with electronic load simulator with Power-Recovery Capability

Jun-Young Choi, Doo-Young Lee, Dong-Geun Lee, Byung-yeol Bae, Byung-Moon Han
Myong-ji University

Abstract - 본 논문에서는 새로 개발된 전력품질 보상 장치의 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. 그리고 전력품질보상기의 하나인 능동전력필터와 연계시험을 수행하였다.

본 논문에서는 제안하는 부하모의장치와 능동전력필터의 연계 특성을 분석할 목적으로 PSCAD/ EMTDC 소프트웨어를 이용하여 시뮬레이션 실시하였고 또한 실적용시 타당성을 검증할 목적으로 20kVA 용량의 부하모의장치와 10kVA용량의 능동전력필터를 제작하여 실험을 실시하였다. 시뮬레이션과 하드웨어 실험결과 제안하는 부하모의장치는 능동전력필터의 다양한 보상 능력 검증에 충분히 활용가능함을 알 수 있었다.

1. 서 론

최근 대체에너지와 전력품질에 관한 관심이 높아지면서 분산전원 연계장치와 전력품질 보상장치에 관한 다양한 연구가 진행되고 있다. 새로 개발된 분산전원 연계장치나 전력품질 보상장치를 실험실에서 효과적으로 성능분석을 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 부하모의장치 이다.[1] 부하모의장치는 단일기기로 선형부하와 비선형부하의 특성을 모의할 수 있고, 부하에서 소모되는 전기를 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 시작품에 의한 실험으로 검증한다. 제안하는 모의부하장치는 시스템손실에 해당하는 전력만 소모하고 흡수한 에너지는 모두 전원으로 회생가능하며 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 비

선형 부하의 특성을 모의하는데 활용되고 인버터는 컨버터가 직류링크 단에 흡수한 에너지를 전원 측으로 회수하는데 활용된다. 제안하는 부하모의장치의 전체 시스템 구성도는 그림 1에 보인다.

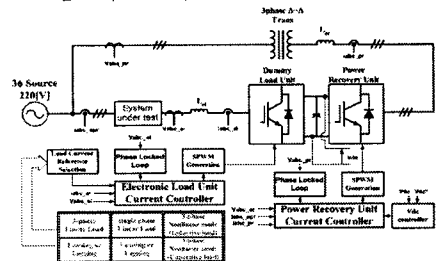


그림 1. 부하모의장치의 전체 구성도
Fig 1. Whole system controller for load simulator

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

표 1. 모드별 부하설정
Table 1. Load Selection Mode

	부하모드	파라미터 설정
1	3상 평형 선형부하	피상전력, 역률, 그리고 지상 설정 피상전력, 역률, 그리고 진상 설정
2	선간 단상 선형부하	피상전력, 역률, 그리고 지상 설정 피상전력, 역률, 그리고 진상 설정
3	3상 다이오드 정류기 비선형 용량성 부하	상전류 최대값 설정
4	3상 다이오드 정류기 비선형 유도성 부하	상전류 최대값 설정

전체제어기는 크게 가상부하기의 전류제어기와 전력회수기의 전류제어기로 구분된다. 부하모의기의 전류제어기는 피시험체의 출력전압과 전류를 검출하여 이 값을 입력으로 사용하여 모드제어기에서 지정한 부하전류의 파형을 형성한다. 모드 제어기는 표 1에 나타낸 바와 같이 6가지 종류의 전류 파형을 제공한다. 한편 제안하는 부하모의제어기는 총 6가지 형태의 부하모의가 가능하나 이들 각각의 조합도 가능하여 단일 부하뿐만 아니라 혼합된 부하의 모의도 가능하다.

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.

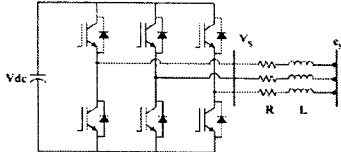


그림 2. 인버터와 계통의 연계등가회로
Fig 2. Equivalent circuit for interconnected converter

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

$$\begin{aligned} V_{ds}^* &= Ri_{ds}^* + L \frac{di_{ds}^*}{dt} - \omega Li_{qs}^* + E_{ds}^* \\ V_{qs}^* &= Ri_{qs}^* + L \frac{di_{qs}^*}{dt} + \omega Li_{ds}^* + E_{qs}^* \end{aligned} \quad (1)$$

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

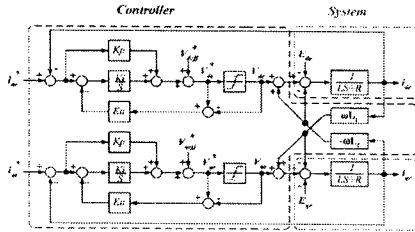


그림 3. 3상 대칭회로에 대한 전류제어기
Fig 3. Current controller for interconnected converter

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

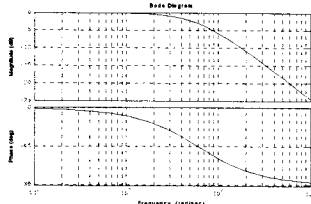


그림 4. bandwidth=6000[rad/sec]일 때 전달함수의 bode선도
Fig 4. Bode diagram of transfer function at bandwidth = 6000[rad/sec]

표 1의 부하모드에서 제어기의 밴드폭(bandwidth)을 고려해야 할 모드는 3과 4에 해당된다. 이 경우 기본과뿐만 아니라 5, 7차, 그리고 11, 13차 고조파의 크기와 위상 지연 특성을 고려해야 실제 다이오드 정류기의 비선형 특성의 구현이 가능하다. 이것은 그림 4에 보인 제어기의 주파수 특성에 기인하는 각 고조파의 위상 지연 값을 알고 있으므로 이를 미리 보상함으로써 위상 지연이 없이 기준 값과 동일한 출력전류를 형성할 수 있다. 그림 5는 이와 같이 비선형부하에서 전류제어기에 공급되는 입력기준신호에 고조파별 위상지연을 고려하는 블록도를 나타낸 것이다.

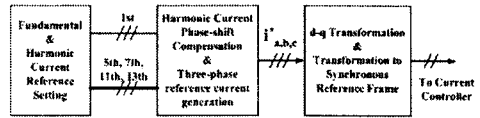


그림 5. 고조파 위상 지연 보상
Fig 5. Configuration of harmonic phase-delay compensation

그림 6에 보이는 전력회수기의 전류제어기는 전원전압, 회수기의 출력전류, 피시험체의 입력전류를 검출한다. 그리고 고조파 전류를 제거하기 위해 30Hz의 대역폭을 갖는 2차 IIR 필터가 사용되었다. 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.

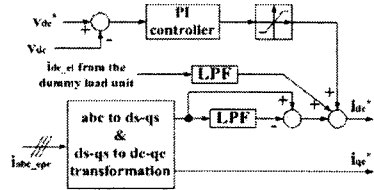


그림 6. 전력회수기의 기준전류 생성
Fig 6. Current reference extraction of the power recovery unit

그림 6에서 V_{dc}^* , V_{dc} , i_{dc}^* , 그리고 i_{qe}^* 는 각각 DC-link 기준전압, DC-link 측정전압, d축 기준전류, 그리고 q축 기준전류이다.

피시험체가 연결되는 전원 단은 최적화된 최소의 전류만 흘러야 한다. 이를 위해서는 유효전력을 제외한 무효전력과 고조파 전류를 최대한 경감시켜야 그 목적을 달성할 수 있다. 이를 위해 전원 무효전류 및 고조파 검출기 등을 구성하여 전력회수기의 전류제어기에 넣어줌으로써 전원단의 무효전류 성분과 고조파전류를 통합적으로 보상하게 된다. 이것은 무효전력 보상기능이 포함된 능동전력필터의 기능과 같다.

4. 시작품 제작 및 실험

제안하는 PWM 인버터식 부하모의 장치의 타당성을 검증하기 위해 20kVA 용량의 프로토타입을 제작하고 실험을 통한 성능분석을 실시하였다. 전체 시스템을 제어하는 메인 프로세서로는 TI사의 DSP(TMS320vc33)로 구성하였으며 표 2에 나타낸 모드별 실험이 실시되었다. 실험세트 회로요소의 파라미터는 표 3과 같다.

표 2. 모드 동작을 위한 시뮬레이션 조건
Table 2. Simulation Conditions for Load Operation Mode

MODE I: 비선형 유도성 부하	
고조파	1, 5, 7, 11, 13차
부하전류	25A _{peak}
MODE II: 복합 불평형부하	
비선형 유도성 부하	15A _{peak}
선형 유도성 부하	S=3300VA, 역률: 0.8
단상 선형부하	S=1555VA
MODE III: 복합 평형부하	
비선형 유도성 부하	15A _{peak}
선형 유도성 부하	S=3300VA, 역률: 0.8

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

표 3. 시스템 파라미터

Table 3. Circuit Parameters

부하모의장치	
시스템 용량	20kVA
정격전압	220V
인버터 용량	20kVA
3상 delta-delta Trans. 용량 및 leakage L	20[kVA],0.2[mH]
Power Recovery Unit 리액터	1.2[mH]
Electronic Load Unit 리액터	1.2[mH]
DC-Link 전압	450[V]
능동전력필터	
시스템 용량	9kVA
정격전압	220V
결합용 리액터	2mH
DC-link 전압	450V
스위칭 주파수	20kHz

그림 7은 실험을 통해 3상 다이오드 정류기의 유도성 및 용량성 부하에서 얻은 기준전류와 출력전류를 나타낸 것이다. 상단은 고조파 위상지연을 보상하기 전 기준전류와 출력전류를 나타낸 것이고 하단은 고조파 위상지연을 보상한 후 기준전류와 출력전류를 나타낸 것이다. 고조파 위상지연보상에 의해 기준전류와 출력전류가 위상지연 없이 일치하는 것을 알 수 있다.

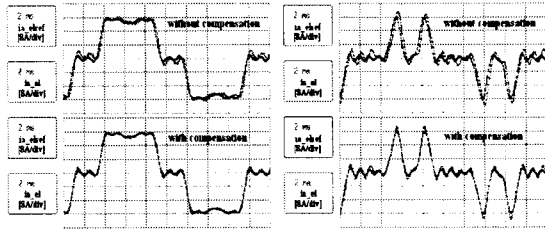
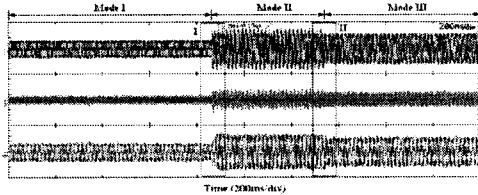
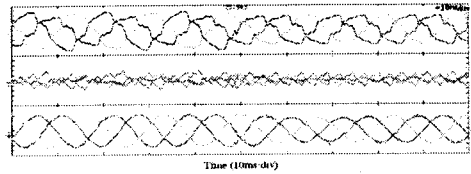


그림 7. 3상 다이오드정류기의 유도성 및 용량성 부하
Fig. 7. Three-phase diode rectifier with inductive and capacitive load

그림 8은 부하모의장치가 표 2에 나타난 모드와 같이 동작할 시의 실험결과를 보인다. 그림 8(a)의 첫 번째 파형은 복합 3상 부하 전류를 보이고 두 번째와 세 번째 파형은 보상전류와 보상된 전원전류를 보인다. 그림 8(b)와 (c)는 확대된 파형을 보인다. 이 두 확대된 파형은 부하모의장치가 3종류의 모드로 동작함을 보이고 능동전력필터는 부하고조파를 제거하고 역률을 보상함을 보이고 있다.



(a) 부하전류, 보상전류, 그리고 전원전류(12A/div)
(a) Load current, compensating current and source current
(b) 영역 I의 확대파형(12A/div)
(b) Expanded waveform of region I



(c) 영역II의 확대파형(12A/div)
(c) Expanded waveform of region II
그림 8. 부하 모드 I, II, III에 대한 실험파형
Fig 8. Experimental results for load mode I, II and III

그림 9는 전력회수기가 전원전류에 포함된 고조파와 무효전력을 보상함을 보인다. 그림 9의 파형은 각각 가상부하기의 A상 전류, 전력회수기의 A상 전류, 그리고 전원 A상 전류를 보이고 있다. 전력회수기의 보상동작 이후에 15A에서 7A로 전원전류의 최대값이 감소함을 알 수 있으며 전원전류의 기본파는 대부분 보상되었으며 전력회수기의 성능 한계에 의해 고조파 성분이 남아있음을 알 수 있다.

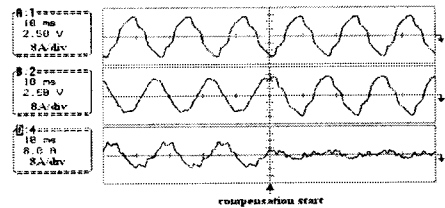


그림 9. 가상부하기와 전력회수기 출력전류, 그리고 전원전류
Fig 9. Dummy load unit output current, power recovery unit output current and source current

5. 결론

본 논문에서는 전력회수 능력이 있는 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 20kVA 용량의 프로토타입을 제작하여 실험을 실시하였다. 시뮬레이션과 프로토타입 실험결과 제안하는 부하모의장치는 손실에 해당하는 에너지만 소모하며 대부분의 에너지를 전원으로 회생하며 전원 연결점의 무효전력과 고조파를 보상할 수 있다.

개발된 부하모의장치는 전기에너지를 절약할 뿐만 아니라 전력품질보상기 및 전력 설비 성능시험시 효과적으로 활용될 것으로 사료된다

본 논문은 한국과학재단 국제공동연구과제로 지원된 연구결과와 일부임(과제번호 F01-2004-000-10226-0)

[참고 문헌]

- [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. 9225-930, 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