전력용반도체 제어형 고조파 및 역률 보상장치 개발

(Development of Harmonic and Power Factor Correction Apparatus controlled by Power Electronics Devices)

김언석* 김경환 박성균 임충호 신현록 김재철

(Oun-Seok Kim Kyung-Hwan Kim Sung-Kyun Park Chung-Ho Ym Hyun-Rok Shin Jae-Chul Kim)

Abstract

본 논문은 마이크로프로세서 및 전력용반도체인 사이리스터로 제어되는 L-C 고조파 필터에 관한 것이다. 개발된 고조파 필터는 3상 220[V] 25[kVA]이며 5고조파 제거용이다. 또한 고조파 필터는 콘덴서에 의해 역률을 개선하는 역할을 한다. 고조파 전류 발생시 3사이클 이내에 고조파 필터가 동작하며, 제로 크로싱 제어로 개폐시 과도서지가 발생하지 않는다. 전류변동에 따른 응답속도가 빨라 부수적으로 전압변동에 의한 플리커 현상을 해소시키는 역할도 한다. 개발된 제품에 대하여 안전성능 및 일반성능 실험결과 만족할 만한 결과를 얻었다.

1. 서 론

정보 통신 산업의 발전 및 생활수준의 향상으로 정보통신기기, 정밀 제어기기, 사무자동화기기, 컴퓨터시스템, 자동생산라인, 온라인서비스 기기 등의 보급이 증가하면서 기존에는 문제가 되지 않았던 전력품질 특히 고조파에 의한 문제가 확대되고 있다[1,2]. 또한 생활수준의 향상으로 플리커와 같이 불쾌감을 주는 현상에 대한 민원이 갈수록 증가 추세에 있다. 이러한 문제를 줄이기 위해서는 전기로나 인버터 등에서 발생하는 고조파는 확산되기 전에 제거하는 것이 최적이다[3,4].

수동필터 관련하여 국내에서는 주로 고압계통에 역율 보상장치를 설치하는 경우가 많다. 개선대상도 주로 역율 개선을 목적으로 하고 있다. 투입스위치는 전자 접촉기 등 기계적인 스위치를 사용하여 빠른 응답속도를 기대하기 힘들며, 수명도 무접점 반도체 스위치와 비교하여 짧은 편이다. 역율 보상 방법도 병렬 콘덴서를 설치하고 순차 투입 방식을 사용하고 있다. 저압계통에서는 전력회사의 규제가 없어 필요시 L-C 수동필터를 사용하였다. 저압계통의 수동필터도 고압계통 필터와 마찬가지로 수동으로 개폐하는 형식으로 개폐서지 및 심야에는 전압상승을 일으키는 문제가 있었다. 또한 빈번한 수동 개폐시 전자접촉기의 수명도 단축되는 단점이 있었다[5,6].

수동필터 관련으로 미주 및 유럽 등 선진국에서는 전력품질에 대한 인식이 높아 GE, Cooper Power System 사 등 대기업에서 많은 제품을 생산하고 있다. 규격측면에서도 IEC와 IEEE에서 규격화되어 체계적인 이론이 정립되어 있다[7,8]. 제품의 수준은 최신 제어이론 및 마이크로프로세서 기술을 사용하고 있다. 일본에서는 이미 20여 년 전부터 제품을 생산하고 있으며 이론도 많이 정립이 되어 있다[6].

본 논문에서는 마이크로프로세서로 제어되는 SCR(Silicon Controlled Rectifier)를 이용한 3상 220[V] 25[kVA] 수동형 L-C 필터를 개발하였다. 개폐는 마이크로프로세서의 제로 크로싱 제어로 개폐서지가 발생하지 않는다. 또한 고조파 및 역률 한계치를 설정하여 설정조건을 만족하면 자동으로 개폐되어 심야의 전압상승 문제를 해결하였다. 지금까지 수동필터는 연속적으로 설치되어 심야에는 전압이 상승되어 각종전기기의 수명을 단축시키는 등 악영향을 끼쳤다. 또한 전자접촉기 등을 사용하여 수동으로 제어하는 경우 개폐서지가 발생하며 수명도 짧았다.

본 논문에서 개발된 장치에 대하여 전자기적합성(Electromagnetic Compatibility, EMC), 절연성능, 제어성능 등을 평가한 결과 만족할 만한 결과를 얻었다. 본 논문에서 개발한 마이크로프로세로 제어하는 전력용 반도체 제어형 고조파 필터는 전기로나 산업용 인버터와 같이 고조파를 발생하는 장치나 전압변동을 주기적으로 유발하여 플리커를 발생시키는 기기 근처에 활용하면 효과가 클 것으로 생각한다.

2. 본 론

2.1. 고조파 필터 설계

2.1.1. 필터종류 및 공진점 설계

L-C 수동 필터의 종류는 크게 turned filter, de-turned filter 및 partially turned filter로 나눌 수 있다. 본 논문에서는 고조파 흡수와 역률 개선이 주요 목적인 partially turned filter를 선정하였다. 이 필터는 고조파를 기준으로 하였을 때 4.4와 4.8조파 사이에서 turning한다.

L-C 필터 설계시 가장 중요한 포인트 하나는 공진점을 결정하는 일이다. 공진점은 여러 가지 요인 때문에 실제 완성된 필터의 공진점은 차이가 날 수가 있다. 이 수치가 특히 중요한 점은 잘못하면 직렬 공진이 발생하여 필터를 파괴시키는 경우가 있기 때문이다. 그러므로 어떠한 경우에도 직렬공진 현상은 피하도록 제작되어야 한다. 공진점에 영향을 주는 파라미터로는 전원 주파수(f) 변동, 콘덴서(C) 및 리액터(L) 용량변동이며 각각의 변동범위는 식 (1)~(3)과 같다[9,14].

$$\frac{\Delta f}{f} \le 1\% \tag{1}$$

$$-7\% \le \frac{\Delta C}{C} \le 12\% \tag{2}$$

$$-3\% \le \frac{\Delta L}{L} \le 3\% \tag{3}$$

일반적으로 단일공진(single-tuned) 필터에 대한 설계 공진점은 다음 공식 (4)에 의해 구할 수 있다.

$$\text{공진점 } n_h = \frac{1}{2\pi . f\sqrt{LC}} \tag{4}$$

위의 식에서 설계 공진점은 주파수와 필터의 리액턴스 및 콘덴서의 캐패시턴스의 함수임을 알 수 있다. 그러므로 이 3가지 요소에서 어느 하나라도 변화하면 설계 공진점에서 편차가 발생함을 알 수 있다. 설계치로부터 총합적 가능한 편차 범위는 위의 3가지 식으로부터 아래 식 (5) 및 (6)과 같이 공식화 할 수 있다[9,14].

$$h\times\frac{1}{1.01\times\sqrt{1.03\times1.12}} \le n_h \le h\times\frac{1}{0.99\times\sqrt{0.97\times0.93}} \tag{5}$$

$$0.92h \le nh \le 1.06h \tag{6}$$

만약 h=5(5고조파)인 경우 4.60 ≤ n5 ≤ 5.30의 범위로 변동 할 수 있고, 만약 h=4.6인 경우 4.23 ≤ n4.6 ≤ 4.88의 범위로 변동 할 수 있다. 이것은 필터를 직렬 공진 문제로부터 보호하기 위한 설계 공진점은 4.6이거나 더 작아야 한다는 것이다. 필터에서 관심 고조파는 5고조파 외에도 많이 있다. 어떤 h차 고조파에 대하여 직렬 공진 문제를 피하기 위한 설계 공진점 안전 범위는 다음 식 (7)과 같이 정의 할 수 있다[9,14].

$$(h-1) < nh \le 0.92\,h \tag{7}$$

여기서 nh는 설계 공진점이고 h는 설계된 필터에서 흡수되는 고조파 차수이다.

2.1.2. 수동소자 설계 파라미터

콘덴서의 전류는 기본파 전류 및 고조파 전류로 구성되어 있다. 만약 turned filter와 같이 고조파 전류가 매우 큰 경우에는 콘덴서의 정격전류를 정의할 때 이 사항을 반드시 고려하여야 한다. 또한 필터에서 리액터를 삽입함에 따른 양단 전압의 상승도 반드시 고려하여야 한다. 콘덴서의 용량은 25[℃] 온도에서 명판에 표기된 용량보다 작지 않아야 하며 또한 정격보다 115% 이상 크지 않아야 한다[10]. 이것은 앞에서 언급한 용량 허용범위와 차이가 있으며 이유는 규격의 용도가 서로 다르기 때문인 것으로 판단된다. 콘덴서의 연속 무효전력 운전 범위는 명판에 기재된 kvar 용량의 135% 범위까지이다. 연속 운전 전압은 정격 실효치 전압의 110%까지이며 Crest 전압은 고조파를 포함하여 정격 실효치 전압의 1.2√2를 초과하지 않아야 한다. 연속전류는 기본파와 고조파를 포함하여 정격전류의 180%까지 이어야 한다[10]. 이것은 콘덴서 양단 전압이 허용범위가 가장 적음을 알 수 있으며 이것은 전압상승이 가장 큰 문제라는 것을 알 수 있다. 그러므로 콘덴서 선정시 가장 역점을 둘 사항은 전압 정격이다. 필터에서 콘덴서 양단 전압상승은 리액터 때문이다. 필터용 캐패시터 양단에 걸리는 공칭 전압은 다음 공식 (8)과 같은 계수만큼 모선 전압보다 높아지게 된다[9].

$$\frac{h^2}{h^2-1} \tag{8}$$

여기서 h는 필터가 turning되는 고조파이다. 예를 들어 h=2 고조파용 캐패시터의 공칭 전압은 라인과 대지간 전압을 기준으로 하였을 때 약 1.33 p.u.가 된다. 즉 약 33% 정도 전압이 상승한다는 것이다. 만약 h=3 고조파용 캐패시터의 공칭 전압은 1.125 p.u.로 약 13% 정도 전압이 상승한다. 만약 h=5 고조파용 캐패시터의 공칭 전압은 1.04 p.u.로 약 4% 정도 전압이 상승한다. 그러므로 2 고조파나 3 고조파용 필터의 콘덴서는 특수 주문하여 사용하여야 한다[12,13].

리액터의 전류는 기본파 전류 및 고조파 전류로 구성되어 있다. 만약 turned filter와 같이 고조파 전류가 매우 큰 경우에는 콘덴서의 정격전류를 정의할 때 이 사항을 고려하여야 한다. 리액터는 최대 기본파 전류 및 고조파 전류에 기인한 열적 부하상태에 대비하여 설계하여야 한다. 리액터의 인덕턴스는 제조상에서 오차가

발생 할 수 있으며 이는 필터의 설계시 고려하여야 한다. 대부분의 필터용으로 허용 가능한 오차는 ±3%이다. 리액터는 스위칭 전류나 전압뿐만 아니라 고장 조건에서 발생 할 수 있는 단락 사고 전류에 견디어야 한다. 리액터의 인덕턴스 값은 정격 전류에서 전압 혹은 전류의 최대 값으로 주어지는 최대 부하 범위에서 ±5% 이상 변하지 않아야 한다. 대부분의 저압용 필터에서 사용하는 철심 코어형 리액터를 사용할 때에는 포화 문제를 고려한다. 왜냐하면 이것은 리액턴스 값을 변화시키고 스위칭 동작시 철공진 현상을 발생하며 부속품들에 과부하 상태를 유발하기 때문이다. 리액터의 손실 또한 고려하여야 한다[11].

일반적인 저압용 L-C 수동 필터는 대부분 스위칭 소자로 전자접촉기 등을 이용한다. 이것의 단점은 스위칭 서지가 발생하며 수명이 짧다는 것이다. 본 논문에서는 전력용 반도체 중에서 경제적이고 서지에 강한 사이리스터(SCR)를 선택하였다. 전력용반도체를 사용하면 수 사이클 단위로 ON-OFF가 가능하여 응답속도가 빠르다. 또한 제로 크로싱 개폐하므로 과도서지가 발생하지 않는다. 단점으로는 과전압이나 과전류에 매우 약하다는 것이다. 전자 접촉기에서는 문제가 없는 외부서지에 파괴될 수 있으므로 대책이 필요하다.

2.1.3. 필터소자 제작 및 선정

o 콘덴서 선정

필터의 용량은 콘덴서 용량이므로 먼저 3상 220[V]용 콘덴서를 선택하였다. 콘덴서는 주문제작을 하지 않고 양산 제품을 활용하였다. 콘덴서의 정격은 500×3[㎌], 41.44×3[A], 220[V], 60[Hz]이다. 콘덴서의 용량을 계산하면 27.36(9.12×3)[kVA]로 정확히 25[kVA]가 아님을 알 수 있다. 이것은 양산 제품을 그대로 사용하였기 때문이다. 콘덴서는 리액터와 콘덴서 및 사이리스터를 직렬로 연결하여 1상을 구성하여야 하기 때문에 단상용 3개로 선정하였다.

o 리액터 제작

리액터의 용량은 콘덴서의 백분율로 나타낸다. 리액터 용량은 콘덴서 용량의 6% 및 13%로 하였다. 콘덴서의 기준 용량은 위에서 언급하였다. L=6%용은 547[VA]×3이며, 단상기준으로 전압 13.2[V], 전류 41.44[A]이다. L=13%용은 1001[VA]×3이며, 단상기준으로 전압 28.6[V], 전류 35[A]이다.

제작은 건식 3상 일괄방식으로 하였으며, 허용오차는 ±3%로 설계하였다. 리액터의 전류 정격은 고조파 전류를 고려하여 필터 정격 전류의 130%로 설계하였다. 이것은 철심의 포화문제를 고려한 것이다. 보빈을 사용하였으며, 함침은 여러 번 실시하여 고조파에 의한 진동 및 소음 문제를 줄였다. 수동필터에서 일반적으로 사용하는 방전코일은 내장시키지 않았다.

o 사이리스터 선정

사이리스터는 필터 입력전원의 라인 회로전압 및 최대전류를 고려하여 결정하였다. 먼저 전압을 고려하면 최대 회로전압은 380[V]이다. 그리고 입력 라인의 최대 전류는 220[V]인 경우 약 72[A]가 된다. 왜냐하면 똑같은 용량에서 전압이 작을수록 많은 전류가 흐르고 델타결선에서 라인 전류는 선간 전류의 1.732배이기 때문이다. 이들을 고려하여 정격전류가 90[A]이고 내압이 1600[V]인 모델을 선정하였다.

2.2. 제어장치 설계

제어장치는 사이리스터를 제어하는 핵심장치로 현장 설치조건을 고려하여 설계하였다. 마이크로프로세서는 인텔 8051 계열의 One-chip을 사용하며, 고조파 분석을 위하여 최소 10비트 A/D Converter를 사용한다. One-chip cpu의 프로그래밍 언어는 c-언어를 사용하고, A/D변환회로 등 속도가 빠른 루틴에는 어셈블러를 사용하였다. IC 등 각종 전자부품들은 구입이 용이한 제조사의 제품을 사용하였다. 고조파 필터는 산업현장에서 사용하므로 서지, 정전기, 급과도 버스트 등 전자기 내성을 가지도록 설계하였다. 또한 산업현장에 설치하므로 온도변화 및 습도에 강하도록 설계하였다. 제어장치 케이스는 현장상황을 고려하여 먼지가 들어가지 않는 구조로 하였다. 제어전원은 1상 및 3상 220[V] 및 380V 전압에서 사용 가능하도록 하였다. 이것은 제어장치를 다양한 전압에서 유연성 있게 사용하기 위함이다. 경제성을 위하여 제어장치는 2대의 콘덴서 및 리액터 뱅크를 제어 할 수 있는 구조로 하였다. 콘덴서 뱅크의 스위칭은 제로 크로싱을 실시하여 서지와 같은 과도 현상이 발생하지 않도록 하였다. 제어장치는 7차까지의 고조파 성분, 역율 및 플리커를 측정하며 표시 장치로 표시한다. 표시장치는 LED 레벨 미터로 하였다. 전자회로는 자동제어 회로를 채택하여 외부에서 조정하지 않고도 조정되도록 하였다. 이것은 수동소자나 소프트웨어 보정을 하지 않고도 사용할 수 있어 PCB 조정시간이 필요 없다. 원격감시 및 제어를 위하여 제어장치 내부의 중요 파라미터는 RS 485와 같은 통신 포트를 이용하여 외부로 전송이 가능하게 하였다. 세부적인 설계 사양은 표 1과 같다. 제어장치의 블록 다이어그램은 그림 1과 같으며, 소프트웨어 순서도는 그림 2와 같다.

표 1. 제어장치 사양
Table 1. Specification of control device

EMC 항목	세부사양
입력전압	3상 220[V]±20% 60[Hz]
입력전류	AC 5[A]
제어소자	SCR, 1600[V] 90[A] 이상
SCR 제어소자	3개 ~ 6개
Main CPU	Intel 8052 one-chip cpu
A/D Converter	10bit(모델 AD7874)
통신 Port	RS485 방식
출력 접점	4개, AC 220[V] 10[A], Dry Contact
분석 요소	고조파, Power Factor 및 Flicker
고조파 분석	최소 7 고조파
SCR 응답속도	최소한 3사이클 이내
사용언어	C-언어 및 어셈블러(고속계산 루틴)

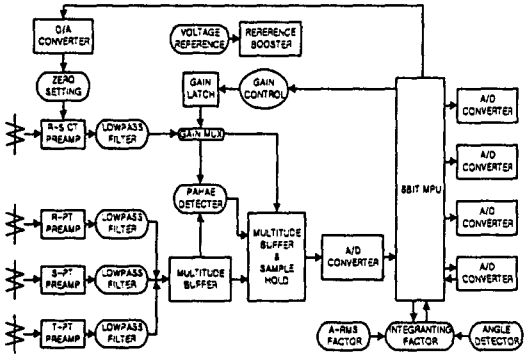

그림 1. 제어장치의 블록 다이어그램
Fig. 1. Block diagram of control device

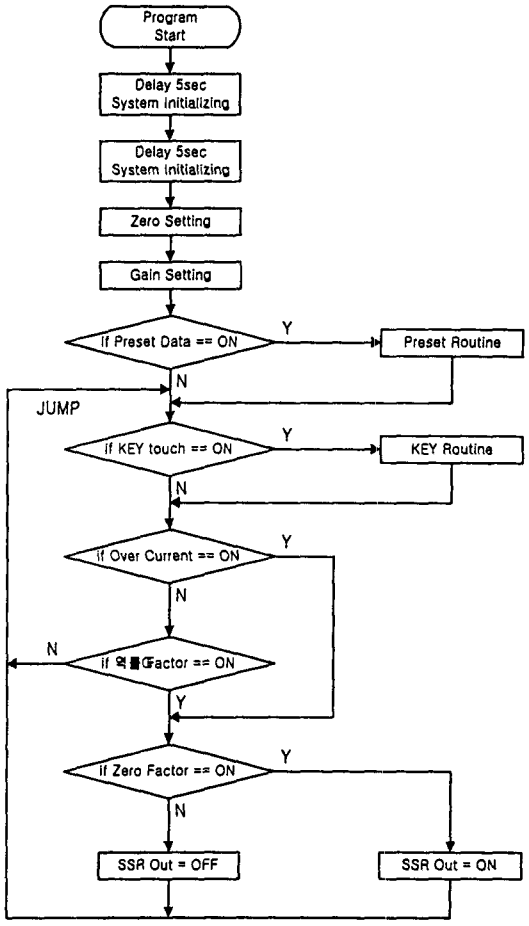

그림 2. 제어 소프트웨어 순서도
Fig. 2. Flowchart of control software

2.3. 시제품 제작

제작된 제어장치 및 리액터 그리고 콘덴서와 사이리스터를 주축으로 하여 3상 220[V] 25[kVA]급 L-C 필터를 제작하였다. 리액터 용량은 L=6% 및 L=13%이다. 고조파 필터의 전체적인 블록다이어그램은 그림 3과 같고, 완성된 필터 시제품 외형은 그림 4와 같다. 그림 4에서 오른쪽이 전압 및 전류를 검출하고 사이리스터를 제어하는 제어장치이고, 가운데 부분이 방열 판에 설치된 사이리스터이며, 하단의 왼쪽이 콘덴서 뱅크이고, 하단의 오른쪽이 리액터이다. 필터는 현장에 설치되므로 방우형 케이스를 사용하였다.

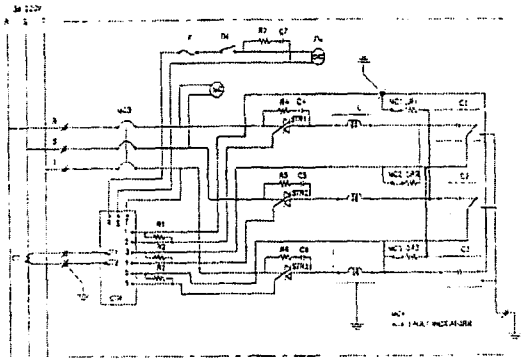

그림 3. 필터 시스템의 개념도
Fig. 3. Schematic diagram of filter system

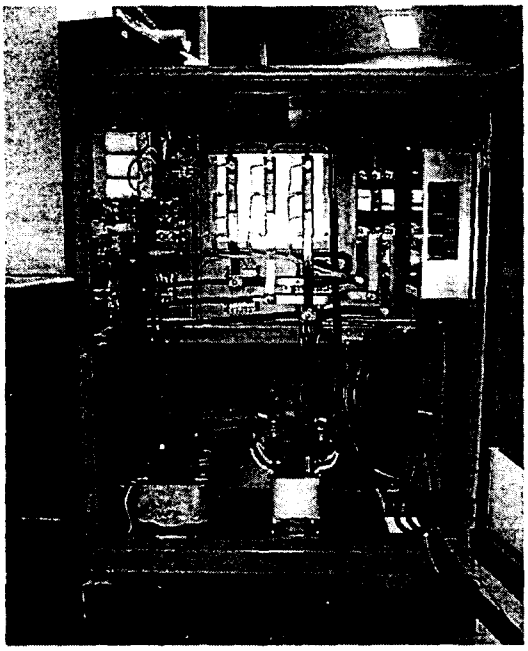

그림 4. 필터 시스템의 외형 사진
Fig. 4. Photograph of filter system

2.4. 시제품의 성능평가 및 결과분석

고조파 필터의 성능평가는 크게 2종류로 분류된다. 먼저 제작된 제품에 대한 안전성능 평가와 특성성능 평가이다.

(1) 안전성(safety) 평가

안전성이란 개발된 제품이 실제현장에서 고장이나 오동작 또는 부품파괴 현상 등이 발생하지 않고 안전하게 사용가능한가를 확인하는 것이다. 평가항목 및 개략적인 성능을 정리하면 표 2와 같다.

표 2. 안전시험 결과
Table 2. Results of safety test

평가항목		사양	평가결과
절연성능	절연저항	DC 500[V] 10[MΩ] 이상	양호
	교류내압	AC 2000[V] 1분간	양호
EMC 시험	SWC	2.5[kV] 2[s] 이상	양호
	EFT/Burst	1[kV] 5[㎑] 1분 이상	양호
	무전기	150[㎒] 및 400[㎒] 5[W]	양호
내구성능		3000회 반복 개폐	양호
온도상승 한도		리액터, 콘덴서, SCR 온도상승	양호
비상상황 모의		필터 통전 중 각종 전원고장	양호

(2) 특성 평가

특성평가는 고조파 필터의 기본적인 특성으로 응답시간, 과도특성, 공진 주파수, 역률개선 성능, 고조파 흡수능력 등이다. 세부적인 사양 및 평가결과는 표 3과 같으며, 실험장면은 그림 5와 같다.

표 3. 성능시험 결과
Table 3. Results of performance test

평가항목	사양	평가결과
제로 크로싱 성능	개폐시 과도현상이 없을 것	그림 6
공진주파수 측정	고조파 필터의 공진주파수 기록	279[㎐]
역률개선 능력	R-L부하를 이용하여 성능 측정	개선 전 : 81.2% 개선 후 : 98.6%
고조파 흡수능력	UPS와 병렬로 연결하여 측정	개선 전 : 2.99% 개선 후 : 2.44%

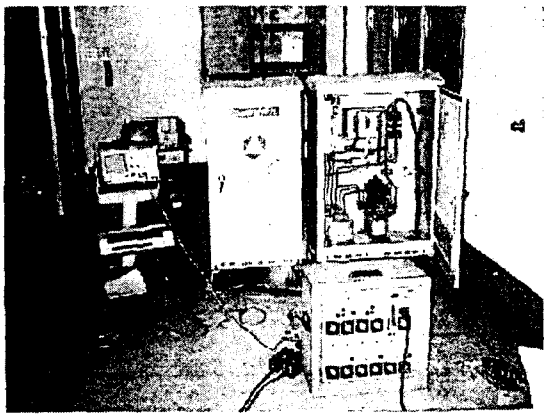

그림 5. 실험장면 사진
Fig. 5. Photograph of experimental setup

표 3에서 응답시간 및 과도특성은 제어장치의 전류변성기에 정현파, 구형파, 삼각파 전류를 0[°]~90[°] 임의의 위상각에서 실시하였다. 전류의 형상에 관계없이 과도현상은 발생하지 않았다. 정현파 전류에 대한 응답시간 및 과도특성은 그림 6과 같다. 그림 6에서 위의 그래프는 제어장치의 전류회로이고 아래 그래프는 사이리스터의 전류회로이다. 제어장치에 전류가 통전 된 후 약 3사이클 후 사이리스터가 통전됨을 알 수 있다. 또한 사이리스터 통전 시 과도현상이 발생하지 않음을 알 수 있다. 공진주파수는 주파수 발생장치를 이용하여 약 1[V]로 측정하였으며, 전류가 가장 큰 주파수를 공진 점으로 기록하였다. 역률개선 능력은 R-L 부하를 이용하여 개선 전에 81.2%로 조정 한 후, 고조파 필터가 동작되었을 때의 역률을 기록하였다. 고조파 흡수능력 평가는 실제 현장에서 무정전전원장치와 병렬로 연결하여 고조파 필터 동작 전후의 고조파 왜형율을 기록하였다. 개발된 고조파필터는 5고조파용인데 현장의 무정전전원장치는 다른 차수의 고조파를 발생시켜 개선이 작은 것으로 나타났다.

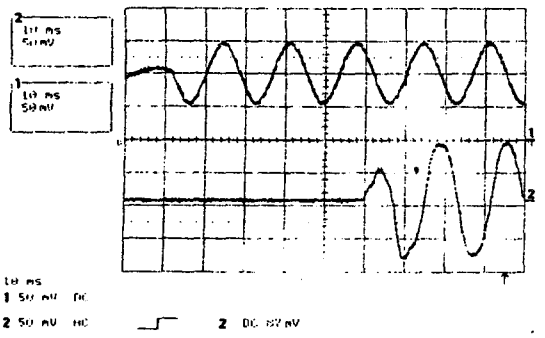

그림 6. 응답시간 및 과도특성
Fig. 6. Response time and transient characteristic

3. 결 론

마이크로프로세서로 제어되는 전력용반도체 제어 3상 220[V] 25[kVA] 수동형 L-C 필터를 개발하였으며 성능평가로부터 얻은 결과는 다음과 같다.

(1) L-C 필터의 사이리스터 소자는 마이크로프로세서로 제로-크로싱 제어를 실시하여 ON-OFF 과도상태가 전혀 발생하지 않았다. 이는 기계적인 전자접촉기를 사용할 때 발생하는 아크 및 과도현상을 제거한 것이다.

(2) 고조파 전류발생 및 역률이 낮아질 경우 고조파 필터 응답시간은 약 3사이클로 전자접촉기와 비교하여 매우 빨랐다. 이것은 용접기나 전기로 부하와 같이 급변하는 부하에 효과적임을 알 수 있다.

(3) 제작된 L-C 필터에 대하여 환경성능평가를 실시하였으며 현장에서 사용가능함을 확인하였다. 특히 전자기적합성(EMC) 시험을 실시하였으며 사이리스터와 마이크로프로세서 제어장치의 서지내성을 확인하였다.

(4) R-L 부하를 이용한 역률개선 성능에서 개선 전 81.2%에서 개선 후 98.6%로 설계대로 개선됨을 확인하였다.

(5) 현장에 설치된 임의 고조파를 발생시키는 무정전 전원장치와 병렬로 설치하여 고조파 제거 기능을 실험한 결과, 개선 전 2.99%에서 개선 후 2.44%로 고조파가 감소되었다. 고조파 흡수율은 발생된 고조파에 따라 다르기 때문에 개선사항이 낮은 것으로 판단한다.

본 논문은 (주)동남물산의 연구비 지원에 의하여 연구되었으며 이에 감사드립니다.

참 고 문 헌

[1] V. E. Wagner, et al, "Effects of Harmonics on Equipment," IEEE T-PWRD, Vol. 8, No. 2, April 1993, pp. 672-680.

[2] Mark F. McGranaghan, et al, "Designing Harmonics Filter for Adjustable-Speed Drives to Comply with IEEE-519 Harmonic Limits," IEEE Trans. Ind. Applicat., VOL. 35, NO. 2, pp.640-648, March/April 1999.

[3] 인철제철(주) 보고서, "전력품질(고조파,플리커) 측정 및 분석연구," 인철제철(주), 1998.

[4] 전력연구원 보고서, "전력계통의 고조파 대책연구", 전력연구원, 1987.

[5] 서장철 외, "배전계통에서의 고조파 전압 왜형율의 실태조사", 추계학술대회 논문집, p146-148, 1996.

[6] JEAG 9702-1995, "고조파억제대책기술지침", 日本電氣協會

[7] IEEE Std 519-1992, "IEEE Recommended Practices and Requirements for Harmonic Control in Electrical Power Systems", pp. 9-11, 14-16.

[8] IEC 61642-1997, "Industrial AC Networks Affected by Harmonics Application of Filters and Shunt Capacitors" pp. 13-35.

[9] Richard F. Dudley, et al, "Special Design Considerations for Filter Banks in Arc Furnace Installations," IEEE Trans. Ind. Applicat., VOL. 33, NO. 1, pp.226-233, January/February 1997.

[10] IEEE Std 1036-1992, "IEEE Guide for Application of Shunt Power Capacitors"

[11] IEC 60289-1988, "Reactors".

[12] IEC 60831-1993, "Shunt power capacitors of the self-healing type for a.c. systems having a rated voltage up to and including 660V.", "Part 1: General - performance, testing and rating - safety requirements-Guide for installation and operation."

[13] IEEE Std 18-1992, "Standard for Shunt Power Capacitors"

[14] Kun-ping Lin, et al, "An Advanced Computer Code for Single-Tuned Harmonics Filter Design," IEEE Trans. Ind. Applicat., VOL. 34, NO. 4, pp.640-648, July/August 1998.