

고조파 저감을 위한 수동필터의 제어시스템에 관한 연구

(A Study on the Control System of Passive Filter to Reduce Harmonics)

전정채* · 유재근 · 이상익

(Jeong-Chay Jeon, Jae-Geun Yoo, Sang-Ick Lee)

요 약

본 논문에서는 고조파 저감을 위해 사용하는 수동필터를 부하의 운전조건에 따라 자동으로 개·폐할 수 있는 DSP 기반의 제어시스템을 개발하였다. 수동필터 제어시스템은 부하에서 발생하는 전압, 전류, 고조파, 무효전력, 역률 등을 측정 및 감시하여 수동필터 개·폐 장치에 신호를 보내어 부하의 운전조건에 따라 필터의 각 분로를 자동으로 개·폐하게 된다. 이러한 제어시스템을 100마력 직류전동기 구동장치를 사용하는 계통에 수동필터와 함께 설치하고 전동기 운전조건에 따라 수동필터를 개·폐시키며 고조파 및 무효전력 등을 측정함으로써 성능을 입증하였다.

Abstract

In this paper, we developed DSP(Digital Signal Processor)-based control system to automatically open and close passive filter, which is used to reduce harmonics, according to operating condition of loads. Passive filter control system automatically open and close each branch of filter according to working conditions of loads by sending signals to open and close installation of passive filter after measuring and monitoring voltage, current, harmonics, reactive power, power factor and so on. We verified it's performance by connecting control system with passive filter in the power line using the 100HP D.C motor drive, opening and closing passive filter according to operation condition of motor, and measuring harmonics and reactive power, etc.

Key Words : Harmonics, Passive Filter, Control System, Power Factor, DSP

1. 서 론

전력변환장치 사용의 급증으로 인해 고조파 발생 부하가 증가하고 있고 이에 의한 피해도 점차 늘어나고 있다. 이러한 고조파 발생을 억제하기 위한 대

책으로 지금까지 가장 일반적으로 사용되어 왔던 방법으로 수동필터(Passive Filter)가 있으며 이러한 수동필터는 주로 R, L, C 등으로 구성되며 그 크기는 제거하고자 하는 고조파의 주파수에서 직렬공진이 발생하도록 설정한다[1,2,3,4,5,6].

이러한 수동필터는 구조가 단순하고 설치 및 보수 유지가 비교적 편리하다는 이점이 있기는 하나 공진 발생가능성, 부하 운전조건 등에 따른 무효전력 과 보상 등의 문제점이 있어 최근 수동필터를 대체하기 위해 고조파 전류를 계통에 주입하여 부하의 고조파

* 주저자 : 한국전기안전공사 전기안전연구원 연구원
Tel : 031-580-3160, Fax : 031-580-3111

E-mail : cameleon@kesco.or.kr

접수일자 : 2004년 4월 26일

1차심사 : 2004년 4월 29일

심사완료 : 2004년 6월 1일

전류를 상쇄시키는 능동필터(Active Filter)에 대한 연구개발이 이루어지고 있다[7]. 그러나 능동필터는 가격이 매우 비싸 자금여력이 충분치 못한 대부분의 수용가에서는 고조파 억제대책으로 사용하기 매우 힘들다.

따라서 능동필터에 비해 가격이 저렴하고 구조가 단순한 수동필터의 문제점을 해결하여 고조파 억제 대책으로 수동필터를 사용할 수 있도록 한다면 고조파에 의한 피해를 줄일 수 있을 것이다.

본 논문에서는 수동필터의 문제점을 해결할 수 있도록 부하의 운전조건에 따라 수동필터의 각 분로를 자동으로 개 · 폐할 수 있는 제어시스템을 제안 및 개발하였고 이를 자동차 방음재 생산을 위해 100마력 직류전동기를 사용하는 계통에 설치하여 시험을 수행하였다.

2. 수동필터

고조파 수동필터는 콘덴서 및 리액터라는 수동소자를 조합하여 특정 주파수 또는 주파수 영역에서 저 임피던스가 되는 분로를 구성하여 고조파 전류를 흡수하는 것이고 기본파에 있어서는 진상설비와 같은 작용을 한다. 수동필터는 크게 저차 고조파를 제거하는 동조필터와 높은 차수의 고조파(17차 이상)를 제거하는 이 하이패스(high pass) 필터로 구분할 수 있으며 이들 구성 예와 임피던스 특성을 그림 1과 그림 2에 각각 나타내었다.

수동필터 설계시 R, L, C를 선정하기 전에 먼저 고려해야할 요소는 선택도(Q)이며 선택도는 동조의 정밀도를 결정한다. 이 선택도에 의해 고공진 계열이 되기도 하고 저공진 계열이 되기도 한다. 고공진 필터는 저차의 고조파 중 하나에 정확히 동조되고 선택도는 보통 30~60정도를 갖는다. 저공진 필터는 0.5~5정도의 값을 가지며, 넓은 주파수 영역에 걸쳐서 낮은 임피던스를 갖는다[1].

그림 1과 같이 단일 동조필터는 보통 저차의 특정 고조파 하나에 동조되는 R-L-C 직렬회로로 이루어져 있고 그 임피던스(Z_f)는 식 (1)과 같으며 공진주파수에서 저항성분 R로 감소하고 이때 선택도(Q)는 식 (2)로 쓸 수 있다.

$$Z_f = R + j\left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right) \quad (1)$$

$$Q = \frac{X_0}{R} \quad (2)$$

식 (2)에서 X_0 는 동조 주파수에서 오옴값으로 표시하는 인덕터(L)나 콘덴서(C)의 리액턴스를 나타내며 식 (3)과 같이 쓸 수 있다.

$$X_0 = \omega_n L = \frac{1}{\omega_n C} = \sqrt{\frac{L}{C}} \quad (3)$$

여기서, ω_n 은 [rad/sec] 값으로 표시되는 동조 각주파수를 나타낸다.

그림 2와 같이 표시되는 하이패스 필터에서 임피던스(Z_f)와 선택도(Q)는 식 (4)와 식 (5)로 각각 나타낼 수 있다.

$$Z_f = \left(\frac{1}{R} + \frac{1}{j\omega L}\right)^{-1} - \frac{1}{j\omega C} \quad (4)$$

$$Q = \frac{R}{\omega_n L} = \frac{R}{X_0} \quad (5)$$

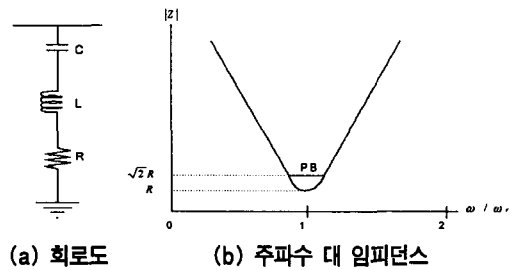


그림 1. 단일 동조필터와 주파수 특성
Fig. 1. Single tuned filter and characteristics

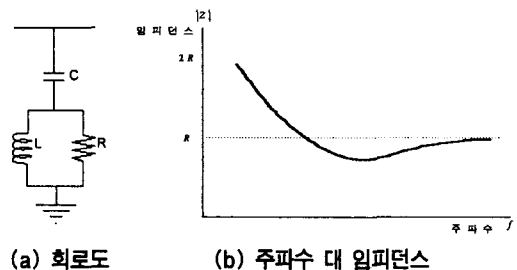


그림 2. 2차 하이패스 필터와 주파수 특성
Fig. 2. Second order high-pass filter and characteristics

3. 수동필터 제어 시스템

3.1 수동필터 제어시스템의 필요성

수동필터를 설계 및 제작시에 현장의 고조파 발생 자료, 전원임피던스, 주파수 변동, 비이론 고조파 발생, 필터의 진상용량, 고조파 억제 목표 기준 값 등 여러 가지 조건들을 고려하여 수동필터를 설치하였다 하더라도 부하의 운전조건에 따라 수동필터의 효과는 달라질 수 있다.

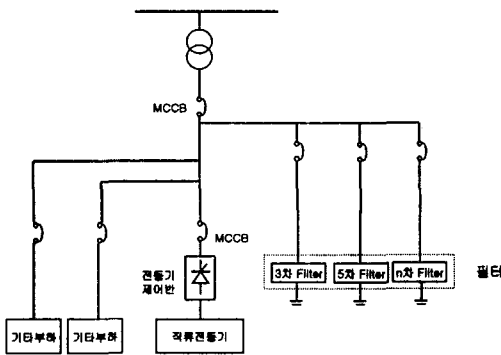


그림 3. 단일 고조파 부하
Fig. 3. Single harmonic load

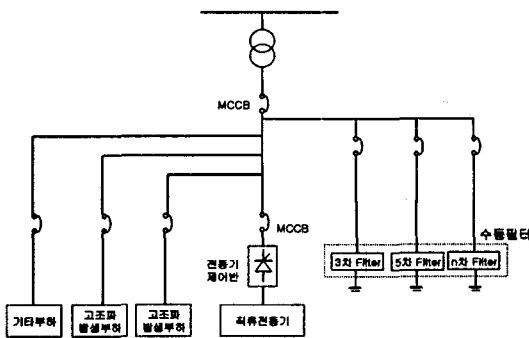


그림 4. 다수의 고조파 발생부하
Fig. 4. Several harmonic loads

그림 3과 같이 직류전동기 가변속 구동장치를 부하로 사용하고 다수의 일반부하를 사용하는 계통 또는 그림 4와 같이 고조파 발생부하가 복수이고 일반부하를 사용하는 경우를 고려해보자.

그림 3과 같은 계통에서 수동필터가 직류 전동기

의 운전시 발생하는 고조파를 억제하기 위해 설계 및 제작 되었을 때 만일 직류 전동기의 운전을 정지시키거나 직류 전동기의 운전조건에 따라 고조파 발생량이 변화하고 역률이 변할 때 수동필터 전체를 차단시키거나 고조파 및 역률 변화에 따라 필터의 일부 분로를 차단 또는 투입해야할 필요성 발생하게 된다.

그림 4와 같이 복수의 고조파 발생부하가 있을 경우 수동필터는 전체 고조파 발생부하를 고려하여 설계 및 제작하였다고 가정하자. 일부 고조파 발생부하의 정지시 수동필터에 의해 무효전력이 보상되어 계통에 진상역률이 발생하여 선로 전력손실 및 변압기 전력손실이 증대되고 계통전압이 상승할 우려가 있다. 또한 직류 전동기 운전조건, 고조파 발생부하 설비 정지 및 투입조건에 따라 수동필터의 각 분로를 차단 및 투입해야 하는 경우가 발생하게 된다. 또한 여기서는 고려하지 않았지만 여러 대의 수동필터를 계통에 투입시켜 사용할 경우에도 부하의 운전조건에 따라 일부 필터를 자동으로 개·폐시킬 필요성도 있다.

특히, 계통의 임피던스 변화, 전원자체에 고조파 성분이 포함되었을 경우 직·병렬 공진 발생의 우려가 있기 때문에 이를 감시하여 수동필터를 차단해야 되고 수동필터의 일부 분로가 고장이 발생하였을 경우 나머지 분로에 과부하가 우려되므로 이를 감시하여 필터를 보호할 필요가 있다.

따라서 본 연구에서는 부하의 운전조건에 따라 전원측과 부하측의 전압, 전류, 무효전력, 역률, 고조파 등을 감시하여 부하의 운전조건에 따라 수동필터를 개폐할 수 있는 제어시스템을 제안하였다.

3.2 수동필터 제어시스템의 개발

본 연구에서 제안한 수동필터 제어시스템은 전압·전류를 측정하는 센서와 필터로 구성되는 신호 입력부, 아날로그 신호를 디지털 신호로 변환하는 A/D 변환부, 연산기능과 주변장치를 제어하는 디지털 신호처리부, 시스템 인터페이스 처리를 수행하는 PLD(Programmable Logic Device)부, SRAM(Static RAM) 및 FROM(Flash ROM)으로 구성되는 메모리부, 시스템의 동작전원을 공급하는 동작

전원부, 수동필터 개·폐장치에 제어 신호를 내보내는 출력부 등으로 그림 5와 같이 구성된다.

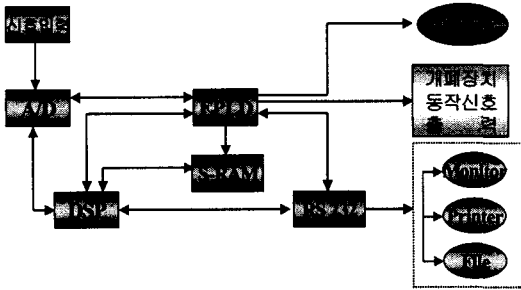


그림 5. 수동필터 제어시스템의 블록선도
Fig. 5. Block-diagram of passive filter control system

그림 5의 수동필터 제어시스템은 전류센서·전압 분배기 등을 통해 전압·전류 등의 신호를 입력한 후 변환기를 통해 A/D 변환기 입력에 적합한 신호로 변환하고 A/D 변환기에 의해 디지털 신호로 변환된다. 여기서 전압 8채널과 전류 10채널의 아날로그 신호를 동시에 A/D 변환하기 위해 conversion start 신호 입력기능이 있는 AC레벨의 아날로그 입력 4채널, 14[bit] A/D 컨버터인 Analog Devices사의 AD7865를 5개 사용하여 A/D 변환부를 설계하였다. 또한 A/D 변환부의 어드레스 및 데이터 버스는 소자의 고장이 발생할 경우 소자 독립고장으로 국한시키기 위해 8[bit] 양방향 버퍼(Buffer) 74F245를 사용하여 DSP와 A/D 변환기 사이의 고장발생에 의한 안정성을 확보하였다.

A/D 변환된 데이터는 디지털 신호처리부의 DSP(TMS320C32)에 전송되고 전압과 전류의 각 사이클에 대해 푸리에 변환을 수행하여 주파수 분석, 전력량 계산 등을 하게 된다. 그리고 DSP와 외부 디지털 소자들 사이의 인터페이스를 EPLD(Erasable/Programmable Logic Device)로 간단하게 처리하였다.

또한 측정 데이터의 저장과 프로세서 프로그램의 빠른 수행을 위해 삼성전자의 4[Mbit] S-RAM 메모리 K6R4008 56개를 직·병렬로 접속하여 메모리 블록을 구성하였다. 이러한 메모리는 한 개의 소켓에 8개의 메모리가 들어갈 수 있도록 7개의 72핀 SIMM

소켓을 이용하여 보드에 장착할 수 있도록 설계하였으며, DSP의 프로그램 메모리로 사용하기 위해 AMD사의 FROM 29F040을 사용하여 512[kB]의 메모리를 구성하였다. FROM은 DSP 프로그램을 내장하는 부분으로 DSP 프로그램을 FROM에 넣으면, reset 신호를 입력한 DSP는 FROM으로부터 프로그램을 입력받아, SRAM에 복사한 후, 프로그램을 실행하여 정상동작 mode로 동작된다. 사진 1에 PCB로 제작하여 구성한 수동필터 제어시스템의 하드웨어를 나타내었다.

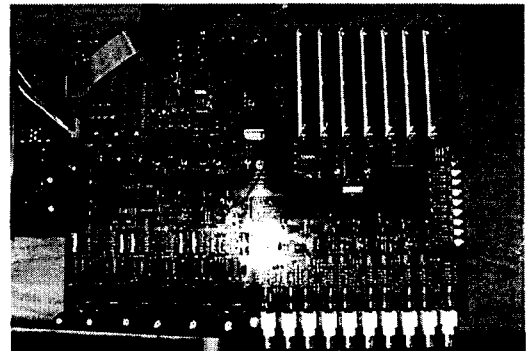


사진 1. 수동필터 제어시스템 PCB
Pic. 1. Passive filter control system PCB

3.3 프로그램의 개발

수동필터 제어시스템은 부하의 운전조건에 따라 전압 및 전류를 측정하여 고조파, 전력 및 역률 등을 분석하고 이에 따라 수동필터를 개·폐하게 된다. 이렇게 수동필터 제어시스템에 의해 측정되고 분석된 데이터를 하드웨어로부터 전송받아 사용자가 확인할 수 있도록 하기 위하여 윈도우 환경에서 동작하는 컴퓨터 프로그램을 볼랜드사의 C++ Builder를 이용하여 개발하였다.

컴퓨터 프로그램의 구성은 그림 6과 같으며 각 차수별 수동필터의 투입상태를 확인할 수 있도록 하였으며, 수용가의 부하측과 전원측 2개소의 측정 포인트로 분류하여 각각의 포인트별 전압, 전류, 전력 등의 파형과 데이터를 확인할 수 있도록 구성하였다. 또한 수용가의 부하 운전상태에 따라 제어기에서 수동필터를 투입하였을 경우 그림 6의 메뉴 아래에 있는 그래프 모양의 버튼을 클릭하면 화면에서 투입되

고조파 저감을 위한 수동필터의 제어시스템에 관한 연구

어 있는 필터의 상태와 전압, 전류, 전압 왜형률, 전류 왜형률, 전력(유효, 무효, 피상전력) 및 역률 등의 분석된 그래프와 데이터를 확인할 수 있도록 구성하였다.

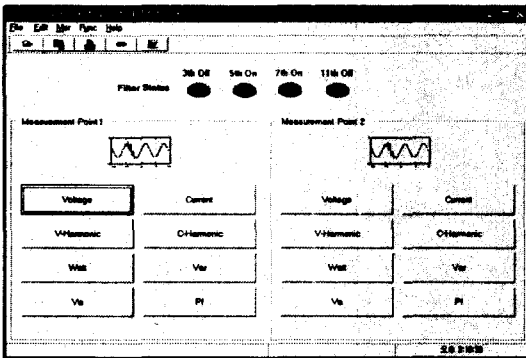


그림 6. 제어시스템 프로그램의 메인화면
Fig. 6. Main window of control system program

4. 수동필터 제어시스템의 시험

4.1 수동필터 개발

본 연구에서 제안한 수동필터 제어시스템의 시험을 위해 필요한 수동필터(용량: 약 27[kVAR])를 설계 및 제작하였다. 수동필터는 3차, 5차, 7차의 동조 필터와 하이패스 필터(11차 이상)으로 구성되며 각 차수별 개·폐 스위칭을 위해 무점접 릴레이(Solid State Relay : SSR)를 사용하여 수동필터 제어시스템에서 출력된 신호에 의해 수동필터 각 분로의 개·폐 동작을 수행하도록 하였다. 이러한 수동필터 설계 및 제작사양을 표 1에 나타내었다.

표 1. 수동필터 설계 및 제작사양
Table. 1. Passive filter design and production specification

구분	3차	5차	7차	hi-pass	비고
컨덴서[kVAR]	6.1	5.7	5.5	10	-
리액터[mH]	2.6	0.95	0.4	0.09	-
SSR[A]	30	50	40	50	개폐장치
기타	V-meter, A-meter, FAN 등				

4.2 수동필터 및 제어시스템의 현장설치

본 연구에서 제안한 제어시스템의 현장실험을 위해 수동필터와 같이 100마력 직류전동기 부하와 압출기, 송풍기 등의 기타 부하를 사용하는 그림 7과 같이 설치하여 직류전동기 운전조건의 변화에 따라 수동필터의 각 분로를 개·폐하도록 구성하였다. 그림 7의 계통은 경기도 이천에 있는 H업체로써 자동차 방음재 등을 생산하기 위하여 직류전동기를 사용하고 전동기의 반복적인 기동 및 정지, 잦은 운전조건 변화 등으로 인해 고조파 억제에 위한 수동필터의 효과를 최적화하기 힘들다.

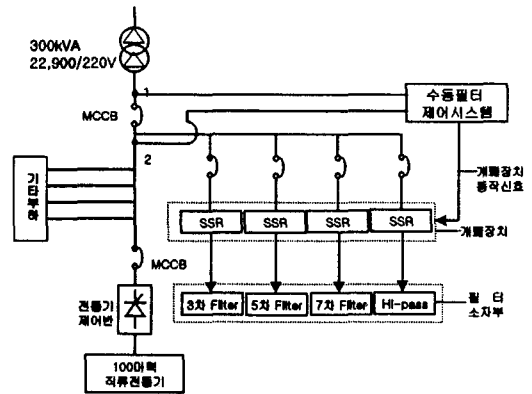
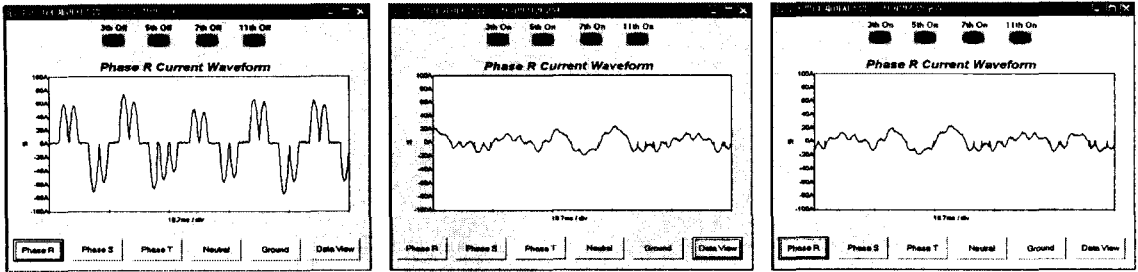


그림 7. 수동필터 제어시스템의 결선도
Fig. 7. Wiring diagram of passive filter control system

4.3 시험 결과

그림 8은 전원측(그림 7의 포인트 1)전류 파형으로서 필터를 설치하지 않았을 경우의 전류파형이 많이 왜곡되어 있고 필터와 제어시스템을 설치하였을 경우는 완전 정현파는 아니지만 필터를 설치하지 않았을 경우보다 파형이 개선된 것으로 나타났다.

그림 9는 전원측 전류크기변화를 나타낸 것으로 그림 9(a)에서 필터를 설치하지 않았을 경우 전동기가 운전하지 않을 때는 전류가 흐르지 않다가 전동기가 운전시 대략 40[A]정도가 됨을 알 수 있다. 그림 9(b)와 같이 부하의 운전조건과 상관없이 계속적으로 필터가 투입되어 있을 경우에는 전동기 운전시 필터에 의한 고조파 저감으로 인해 실효 전류가 전원측에 10[A] 수준으로 감소하였으나 전동기 정지

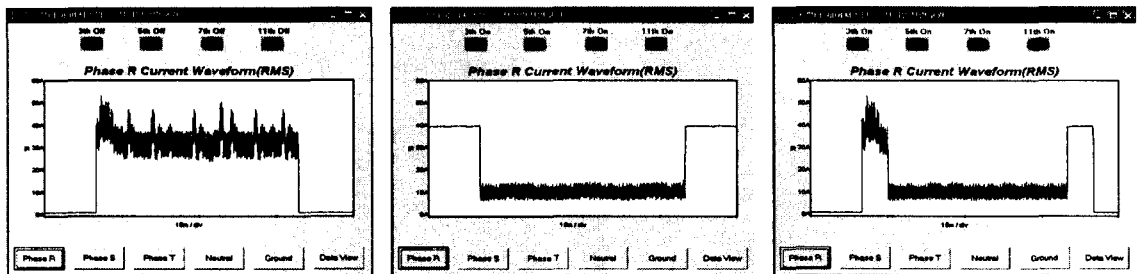


(a) 필터 미설치

(b) 필터설치

(c) 필터와 제어시스템 설치

그림 8. 전류 파형
Fig. 8. Current Waveform

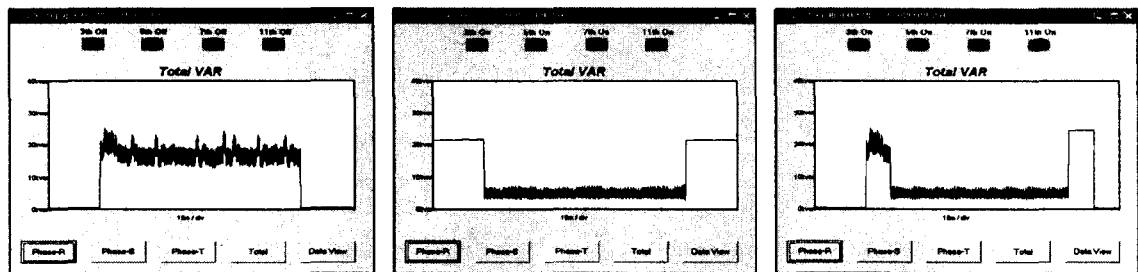


(a) 필터 미설치

(b) 필터 설치

(c) 필터와 제어시스템 설치

그림 9. 전류 크기 변화
Fig. 9. Variation of current magnitude



(a) 필터 미설치

(b) 필터설치

(c) 필터와 제어시스템 설치

그림 10. 무효전력의 크기변화
Fig. 10. Variation of reactive power magnitude

시에에는 필터가 계속 투입되어 있어 필터 임피던스로 인해 무효전류가 40[A]정도 발생하는 것을 알 수 있다. 그림 9(c)는 직류전동기가 운전시에 수동필터를 투입하고 직류전동기가 정지모드로 일정한 시간(본 연구에서는 업체의 운전패턴에 따라 5분정도)이 유지되면 그에 따라 수동필터 제어시스템에 의해 자동으로 수동필터를 개방시킨다. 그림에서 알 수 있듯

이 직류전동기가 운전시에는 필터를 투입하여 고조파를 감소시킴으로써 전류를 10[A] 수준으로 작아졌고 직류전동기 정지시 수동필터를 개방시켜 일정시간(5분)이 지난 후에는 무효전류가 흐르지 않는 것을 알 수 있다.

그림 10은 전동기 운전조건 변화에 따른 전원측 무효전력 크기변화를 나타냈고 있다. 그림 10(a)에

서처럼 필터가 없을 경우에는 전동기가 정지시 무효전력이 없고 전동기 운전시 약 25[kVAR] 정도 발생하게 된다. 그림 10(b)에서처럼 전동기 운전조건과 상관없이 필터를 계속 투입하였을 경우에는 전동기 운전시는 필터에 의해 무효전력을 보상해줌으로써 무효전력이 5[kVAR] 정도까지 줄었으나 전동기 정지시에도 필터가 계속 투입되어 있어 무효전력이 23[kVAR] 정도 수동필터에 의해 공급되고 있다. 그림 10(c)는 제어시스템을 설치하여 전동기 운전조건에 따라 필터를 개·폐시켰을 때의 결과로서 전동기 운전시에는 필터를 투입시켜 무효전력을 보상해 주어 전체적으로 역률을 개선시키고 전동기 정지시 필터를 개방시켜 무효전력의 공급을 억제시켜 무효전력의 과보상을 막아주고 있음을 알 수 있다.

5. 결 론

본 연구에서는 부하 변동시 수동필터 성능 저하 등의 문제점을 해결할 수 있는 수동필터 제어시스템을 개발하였다. 또한 필터의 동작상태 및 성능, 제어시스템의 동작상황 등을 사용자가 확인할 수 있도록 전용의 프로그램을 개발하였다. 수동필터 제어시스템은 고조파, 무효전력, 역률 변화 등에 따라 필터의 각 분로를 자동으로 개·폐할 수 있고 또는 복수 필터 설치시 필터를 자동으로 개·폐할 수 있다.

본 연구에서 개발한 수동필터 제어시스템을 100마력 직류전동기 부하에서 필터와 적용하여 시험을 하였다. 시험결과 직류전동기 운전조건이 변하고 무효전력 및 고조파 변화에 따라 필터의 분로를 개·폐함으로써 전동기 정지시 수동필터를 개방시켜 무효전류 발생을 억제시키고 이에 따른 무효전력 과보상 문제도 해결할 수 있었다. 또한 실제 실험계통에서 발생하지 않았지만 계통과의 공진 발생시나 필터 고장시 자동으로 필터를 개방시킬 수 있고 본 연구에서 실제 시험하지 않았지만 다수의 고조파 발생부가 사용되고 있거나 다수의 필터가 설치되어 있는 경우에도 적용이 가능하리라 예상된다.

References

- (1) J. Arrillaga, D. A. Bradley, "Power System Harmonics" John Wiley & Sons, 1985.
- (2) E. J. Borrebach, "The Effect of Arc Furnace Loads on Power Systems", Ninth Annual Meeting of the IEEE Industrial Application Society, Pittsburgh, PA, 1974.
- (3) 한국전기안전공사, "전기사용장소의 고조파 장해분석 연구", 1996.
- (4) 고조파 저감기술 조사전문위원회, "고조파 저감기술 현황과 전망", 대한전기학회, 1993.
- (5) 관동전기보안협회, "고압 자가용 수용가의 고조파 장해·억제대책 사례 Q&A", 설안당, 2000.
- (6) 한국전기안전공사, "고조파 억제용 수동필터의 현장 적용화 연구", 1999.
- (7) Tein-Ting Chang and Hong-Chan Cang, "An Efficient for Reducing Harmonic Voltage Distortion in Distribution Systems with Active Power Line Conditioners", IEEE Transaction on Power Delivery, Vol. 15, No. 3, 2000.

본 연구는 산업자원부의 전력산업기반기금 전력연구개발사업 연구비 지원으로 수행되었습니다.

◇ 저자소개 ◇

전정재 (全正采)

1971년 6월 8일생. 1997년 원광대학교 전기공학과 졸. 1999년 원광대학교 대학원 전기공학과(석사)졸. 현재 한국전기안전공사 전기안전연구원 진단연구1팀 연구원.

유재근 (兪在根)

1965년 12월 5일생. 1990년 건국대학교 전기공학과 졸. 1992년 건국대학교 대학원 전기공학과(석사)졸. 1992~1996 대우전자 연구소 근무. 현재 건국대학교 대학원 박사과정 수료. 현재 한국전기안전공사 전기안전연구원 진단연구1팀장.

이상익 (李尙益)

1968년 12월 9일생. 1994년 호서대학교 전기공학과 졸. 1996년 호서대학교 대학원 전기공학과(석사)졸. 현재 건국대학교 대학원 박사과정 수료. 현재 한국전기안전공사 전기안전연구원 진단연구1팀 연구과장.