

디지털 필터링을 이용한 무효전력 제어에 관한 연구

A Study on a Reactive Power Control using Digital Filtering

우 천 희, 강 신 준, 이 덕 규, 우 광 방, 이 성 환

(Chun-Hee Woo, Shin-Jun Kang, Duk-Gyu Lee, Kwang-Bang Woo and Sung-Hwan Lee)

Abstract : This paper discusses the development of a reactive power controller using digital signal processing. Digital Signal Processing is the technique of using digital devices to process continuous signals or data, often in real-time. And DSP algorithms are associated with a discrete time interval between input samples. When one designs a digital filter, one can use a Laplace transform to determine the continuous time frequency response. The corresponding discrete time transform is called Z transform and depends upon discrete samples of the input spaced equally in time. The objectives of this paper are to minimize real power losses and improve the power factor of a given system. Also, the implementation of a direct-form non recursive filter on the TMS320C31 has been described. The application of this microprocessor-based controller using DSP on test system reveals its numerous advantages. Performance and features of the controller for the reactive power control are analyzed.

Keywords : digital signal processing, reactive power controller, power factor, microprocessor-based controller

I. 서론

플랜트의 대부분을 차지하고 있는 전동기 부하는 지상 무효전력을 발생시키며, 이 무효전력이 증대하게 되면 선로의 전압강하, 전력손실의 증가를 초래하게 되어 전력요금의 상승 및 설비용량의 증대를 초래한다. 전기공급규정(제44조)에 의하면 전기를 공급받는 수용가의 사용설비 출력 또는 사용전력량 및 무효전력량에 의해 역률을 산출하여, 수용가의 역률이 90%를 초과하는 경우 전력요금의 기본요금을 감액하며 미달되는 경우 요금 추가를 규정하고 있다. 이에따라 일반적으로 수용가에서는 지상 무효전력량을 감소시키기 위하여 역률개선용 콘덴서를 설치하여 운용하고 있지만, 에너지절감 및 경제적 측면에서 자동적으로 콘덴서를 투입, 차단시키는 제어기의 필요성이 커지고 있다. 일본을 중심으로 전자회로를 이용한 정지형 역률제어기가 상품화되고 있으나, 최근의 제어기들은 제어기가 갖는 본래의 제어기능외에 자기진단 기능 및 상위 원방감시제어 시스템과의 통신 기능을 갖는 단말장치로서 동작할 수 있도록 요구되고 있기 때문에 위와 같은 정지형 역률제어기는 완전한 디지털형 제어기라 생각할 수 없다.

따라서 본 연구에서는 마이크로프로세서를 사용하여 부하단의 전류·전압을 실시간적으로 샘플링하여 무효전력 및 역률을 계산하고 목표치에 일치하도록 콘덴서의 बैं크를 자동제어 하는 디지털형 무효전력 제어기를 제작하였다. 무효전력 제어기의 정밀도를 확보하기 위하여 디지털 필터링 기법을 사용하였으며, 추출되어진 기본파 성분을 이용하여 제어시 필요한 여러 가지의 제어량을 산정하였다. 또한 실시간 제어기능을 구현하기 위하여

신호처리 전용 프로세서를 사용하여 하드웨어를 제작하였으며, 성능시험을 거쳐 제작되어진 제어 알고리즘 및 제어기의 기능을 검증한다.

II. 디지털 필터링에 의한 무효전력 계산

필터링은 신호 프로세싱 기법으로서, 연속적인 아날로그 입력이나 디지털 회로에 의한 이산시간 디지털 입력에 대하여 요구되는 신호를 얻어내기 위해 불필요한 잡음이나 신호영역을 제거하는데 널리 사용하고 있다. 무효전력 제어기에서 제어변수로 사용하는 역률 및 무효전력값을 얻기 위하여 부하에 흐르는 전류와 전압을 센서를 통하여 샘플링하게 된다. 샘플링되어지는 아날로그량은 12bit A/D변환기(AD678KD)에 의하여 디지털량으로 변환되어, 메모리에 저장된 후 디지털 필터링되어진다.

1. DFT에 의한 무효전력 및 역률 계산

연속적인 입력신호 $X(n)$ 의 1주기를 N 회 샘플링하여 실수부(Real component)와 허수부(Imaginary component) 요소로 분리하여 나타낼 수 있다. 이때 필터의 구성은 피드백이 없는 비귀환 필터 구조를 따르며, $y_r(k)$ 및 $y_i(k)$ 는 k 번째 샘플링 순간에서의 출력값이다.

$$y_r(k) = \frac{2}{N} \sum_{n=0}^{\infty} X(k-n) \cos(k-n) \quad (1)$$

$$y_i(k) = \frac{2}{N} \sum_{n=0}^{\infty} X(k-n) \sin(k-n) \quad (2)$$

기존의 연구에서 실시간 제어를 위하여 한 주기당 샘플링 횟수는 $N=12$ 가 가장 적합하다고 연구되었으며, 이때 샘플링 주기는 1.38ms가 된다[2][3]. 정현파 입력신호로부터 실시간으로 실수 및 허수부 전류 또는 전압값을 얻기 위하여 그림 1, 2와 같이 2개의 데이터윈도우를 선정하였다. 데이터윈도우 1의 샘플집합을 $\{X_k, k = 0, 1, 2, \dots, N-1\}$ 이라 하면 샘플집합으로부터 페이지 표현식

을 얻을 수 있다. 샘플링 각 $2\pi/N(\text{radian})$ 에 일치하는 시간이 지난 후 새로운 샘플링 값이 얻어 지는데, 이 때 부터가 데이터윈도우 2가 사용이 되며 새로운 샘플집합 X_k 가 생성되어진다. 실수부 $y_r(k)$ 를 얻기 위한 여현파의 윈도우는 그림 2와 같으며, $N=12$ 일 때의 실수부를 표현하는 (1)은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned}
 y_r(k) &= \frac{2}{12} \sum_{n=0}^{11} X(k-n) \cos(k-n) \\
 &= \frac{1}{6} \left\{ X(k) - X(k-6) + \frac{\sqrt{3}}{2} [X(k-1) \right. \\
 &\quad \left. + X(k-11) - X(k-5) - X(k-7)] \right. \\
 &\quad \left. + \frac{1}{2} [X(k-2) + X(k-10) - X(k-4) \right. \\
 &\quad \left. - X(k-8)] \right\} \quad (3)
 \end{aligned}$$

마찬가지로 허수부 $y_i(k)$ 를 얻기 위한 정현파의 윈도우는 그림 1과 같으며, 허수부를 표현하는 (2)는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned}
 y_i(k) &= \frac{2}{12} \sum_{n=0}^{11} X(k-n) \sin(k-n) \\
 &= \frac{1}{6} \left\{ X(k-3) - X(k-9) + \frac{1}{2} [X(k-1) \right. \\
 &\quad \left. + X(k-5) - X(k-7) - X(k-11)] \right. \\
 &\quad \left. + \frac{\sqrt{3}}{2} [X(k-2) + X(k-4) \right. \\
 &\quad \left. - X(k-8) - X(k-10)] \right\} \quad (4)
 \end{aligned}$$

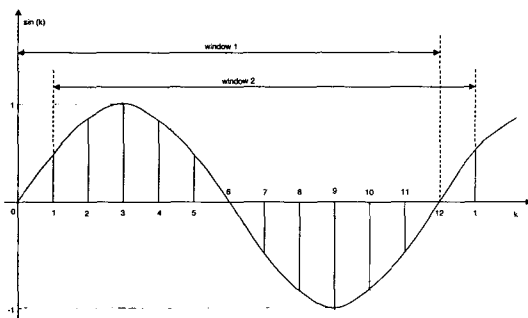


그림 1. 정현파의 샘플링 및 윈도우.
Fig. 1. Window and sampling of sine function.

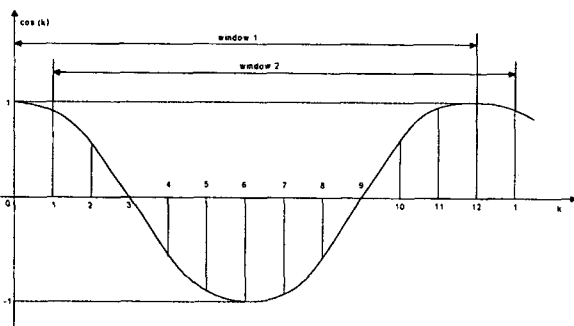


그림 2. 여현파의 샘플링 및 윈도우.
Fig. 2. Window and sampling of cosine function.

Fourier transform 필터링에 의해 구해진 실수 및 허수분의 주파수 응답특성은 기본파의 정수배 조파가 완전히 제거되는 특성이 있으며, 무효전력을 제어하기 위해서 상전압 및 상전류의 실수·허수분 성분이 이용된다. 적용되는 계통 또는 부하단의 상전류에 대한 실수 및 허수성분을 $I \cos \psi$, $I \sin \psi$ 라 하고, 상전압의 실수 및 허수성분을 $V \cos \theta$, $V \sin \theta$ 라 하면 무효전력 및 역률값은 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\begin{aligned}
 \text{무효전력} &= VI \sin(\theta - \psi) \\
 &= V \sin \theta I \cos \psi - V \cos \theta I \sin \psi \\
 &= V_i I_r - V_r I_i \quad (5)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \text{유효전력} &= VI \cos(\theta - \psi) \\
 &= V \cos \theta I \cos \psi + V \sin \theta I \sin \psi \\
 &= V_r I_r + V_i I_i \quad (6)
 \end{aligned}$$

여기서, I 와 V 는 전류·전압의 최대치이고, θ , ψ 는 각각 기준파형과의 위상차이다. 이때 역률값은 전압, 전류의 최대치와 유효전력을 나타내는 (6)을 이용하여 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\text{역률} = \frac{\text{유효전력}}{\text{피상전력}} = \frac{V_r I_r + V_i I_i}{VI} \quad (7)$$

2. 필터의 전달함수

일반적으로 샘플링 입력값과 출력을 저장하기 위해 사용되어지는 지연요소, 즉 N 개의 메모리 요소를 포함하는 N 차 필터는 그림 3과 같다[4]. 이때의 필터 방정식은 (8)과 같으며, 필터방정식을 z 변환하면 (9)와 같다.

$$y(n) = \sum_{q=0}^{\infty} b_q X(n-q) - \sum_{p=1}^{\infty} a_p y(n-p) \quad (8)$$

$$Z[y(n)] + \sum_{p=1}^{\infty} a_p Z[y(n-p)] = \sum_{q=0}^{\infty} b_q Z[X(n-q)] \quad (9)$$

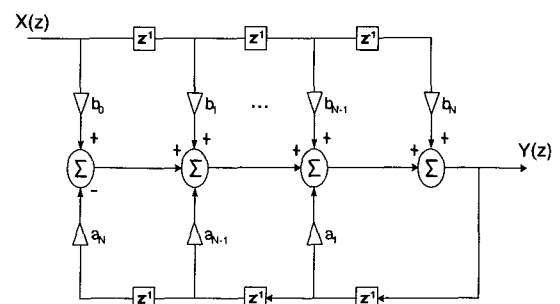


그림 3. N차수를 갖는 filter의 일반적인 구조.
Fig. 3. General filter structure of Nth order.

Z 변환의 천이(shift)특성은 (10)과 같다.

$$Z[X(n-p)] = z^{-p} Z[X(n)] = z^{-p} X(z) \quad (10)$$

천이특성을 이용하여 (9)를 다시 쓰면 (11), (12)와 같이 나타낼 수 있다.

$$Y(z) + \sum_{p=1}^{\infty} a_p z^{-p} Y(z) = \sum_{q=0}^{\infty} b_q z^{-q} X(z) \quad (11)$$

$$Y(z)[1 + \sum_{p=1}^{\infty} a_p z^{-p}] = X(z)[\sum_{q=0}^{\infty} b_q z^{-q}] \quad (12)$$

그러므로 그림 3과 같은 N 차 필터의 전달함수 $H(z)$ 는 다음과 같이 정의할 수 있다.

$$H(z) = \frac{Y(z)}{X(z)} = \frac{\sum_{q=0}^{\infty} b_q z^{-q}}{1 + \sum_{p=1}^{\infty} a_p z^{-p}} \quad (13)$$

만약, 출력의 피드백이 없는 비재환(non-recursive) 필터를 고려하는 경우 $a_p=0$ 이 되어, 전달함수 $H(z)$ 는 (14)와 같이 간단하게 쓸 수 있다.

$$H(z) = \frac{Y(z)}{X(z)} = \sum_{q=0}^{\infty} b_q z^{-q} \quad (14)$$

일반적으로 전달함수를 구하는 (14)를 이용하여 (3), (4)에서 표현한 실수부와 허수부 성분의 z 변환 전달함수를 구하면 다음과 같다.

$$H_r(z) = \frac{1}{6} [(1 - z^{-6}) + 0.866(z^{-1} + z^{-11} - z^{-5} - z^{-7}) + 0.5(z^{-2} + z^{-10} - z^{-4} - z^{-8})] \quad (15)$$

$$H_i(z) = \frac{1}{6} [(z^{-3} - z^{-9}) + 0.5(z^{-1} + z^{-5} - z^{-7} - z^{-11}) + 0.866(z^{-2} + z^{-4} - z^{-8} - z^{-10})] \quad (16)$$

III. 무효전력 제어기의 시제품 제작

대부분의 전력 사용기기 특히 전동기 부하는 일반적으로 지상 무효전력을 발생하게 된다. 무효전력이 증대하게 되면 전류가 크게 되어 선로의 전압강하, 전력손실의 증가를 초래하게 되어 송배전 설비용량을 증가시켜야만 한다. 일정 지상역률을 기준으로 하여 전력요금을 부과하므로 수용가에서는 역률개선용 콘덴서를 설치하지만, 콘덴서의 용량은 고정되어 있기 때문에 야간이나 휴일인 경우와 같이 경부하시에는 역으로 투입된 콘덴서에 의해 진상 무효전력이 커지게 된다[1][5]. 그러므로 설정된 무효전력이 초과한 경우에 자동적으로 콘덴서를 투입, 차단함으로써 역률을 개선시키고 무효전력에 의한 전압변동을 경감시키는 제어기를 제작하였다.

1. 무효전력제어 알고리즘

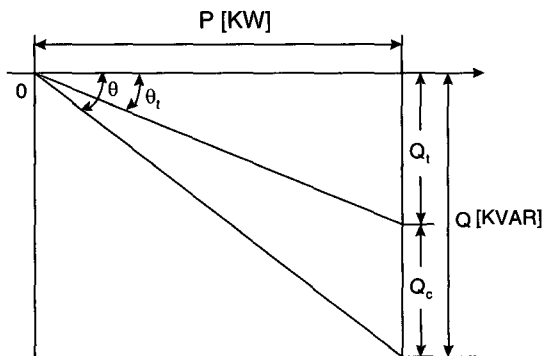


그림 4. 역률제어를 위한 벡터도.

Fig. 4. Vector diagram for power factor control.

무효전력 제어기는 부하의 무효전력을 목표 무효전력 이하가 되도록 콘덴서 뱅크를 투입하여서 역률을 개선하여야 한다. 부하의 최대 수요전력을 P [KW], 부하 최대 무효전력을 Q [KVAR], 역률을 $\cos \theta$ 로 표시하여 부하의 벡터도를 그리면 그림 4와 같다.

여기서, Q_i 는 목표 무효전력[KVAR], Q_c 는 투입해야 될 콘덴서용량[KVAR]이며 $\cos \theta$ 는 현재역률, $\cos \theta_i$ 는 목표역률이다. 목표역률 $\cos \theta_i$ 가 정해지면 부하 벡터도로부터, 부하의 최대 무효전력 Q 및 목표 무효전력 Q_i 를 구할 수 있으므로 투입해야 될 콘덴서용량 Q_c 는 (17)과 같다.

$$Q_c = Q - Q_i = P(\tan \theta - \tan \theta_i) \quad (17)$$

$$= P \left[\sqrt{\frac{1}{\cos^2 \theta} - 1} - \sqrt{\frac{1}{\cos^2 \theta_i} - 1} \right] \text{ [KVAR]}$$

위와 같은 콘덴서 용량을 투입하여 무효전력을 경감시키면, 일정한 설비용량 즉 피상전력에서는 유효전력이 증가하게 된다. 마찬가지로, 진상 영역으로 목표 무효전력을 초과하는 경우 콘덴서뱅크가 투입 및 차단을 반복하는 헌팅(Hunting) 현상이 발생하지 않도록 윗 식에서 구한 Q_c 를 이용하여, 차단시켜야 하는 콘덴서 뱅크 용량을 구할 수 있다[5].

투입 콘덴서용량 + 차단 콘덴서용량

$$\geq 1.2 \times \text{단위 최대 콘덴서용량} \quad (18)$$

또한 공휴일 또는 야간의 경부하시에 투입치보다 조금 큰 지상 무효전력 때문에 콘덴서 뱅크가 투입된다면, 진상 무효전력이 발생하게 되어 이것에 의해 전력손실이 발생하게 된다. 무효전력 제어기에서는 경부하시 모든 콘덴서 뱅크를 차단하도록 경부하 영역을 설정하여 제어한다.

2. 무효전력 제어기의 제작

계통에 흐르는 전류와 전압은 샘플링 및 디지털 필터링을 거친 후 메모리에 저장된다. 무효전력 제어기는 메모리에 저장되어진 디지털량과 무효전력제어 알고리즘을 사용하여 무효전력 및 역률을 계산하고 목표치에 일치되도록 콘덴서뱅크의 갯수를 제어한다.

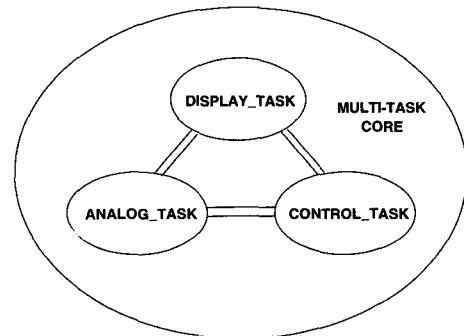


그림 5. 무효전력 제어기의 TASK 구성.

Fig. 5. Structure of task for reactive power controller.

제작되어진 소프트웨어는 그림 5와 같이 멀티태스크 기법을 사용하였으며[8], 크게 LCD 및 Key 입력에 의하여 제어변수를 설정하는 DISPLAY_TASK, 아날로그량을 샘플링하여 무효전력 및 역률을 실시간적으로 처리하는 ANALOG_TASK와 콘덴서 뱅크를 투입, 차단시킴으로써 무효전력을 제어하는 CONTROL_TASK로 구성되며, 특히 무효전력 제어에 있어서 중심이 되는 CONTROL_TASK의 흐름도는 그림 6과 같다.

위와같은 무효전력 제어기의 소프트웨어 성능을 구현하기 위하여 본 연구에서는 32bit 소수점연산을 고속도로 가능케 해주는 TI사의 전용 DSP칩 TMS320C31를 사용하여 하드웨어를 제작하였다. TMS320C31은 레지스터 중심의 CPU 구조로 되어 있으며 크게 소수점과 정수 산술연산 및 논리연산을 처리하는 ALU, 32bit shifter와 내부 BUS로 구성되어 있다[6][7]. 제작되어진 하드웨어의 블록도는 그림 7과 같다.

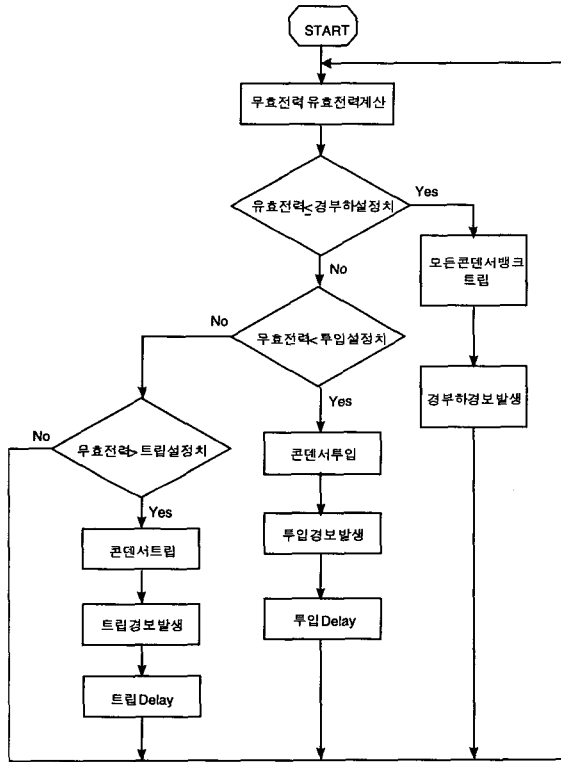


그림 6. CONTROL_TASK의 흐름도.
Fig. 6. Flowchart of CONTROL_TASK.

IV. 시뮬레이션 및 동작시험

제작되어진 무효전력 제어기의 알고리즘 및 하드웨어의 성능을 검증하기 위한 시뮬레이션용 계통을 설정하였으며, 디지털 필터의 특성 및 콘덴서 투입·차단시 제어기의 동작특성을 측정하였다.

1. 디지털 필터의 특성 시뮬레이션

무효전력 제어기에서 사용하는 디지털 필터의 성능을 측정하기 위한 시뮬레이션 블록도를 그림 8과 같이 작성하였다. 기본파에 3조파, 5조파의 고조파성분을 중첩시켜 입력시켰으며 사용한 전달함수는 (15)와 (16)을 사용하였

다[9]. 필터의 특성을 측정하기 위하여 본 연구에서는 중첩되는 고조파의 크기를 변화시키고, 고조파의 위상을 변화시키면서 샘플링 수에 따른 주파수 응답 특성을 구하였다. 그림 9~11은 고조파 크기를 변화시킨 경우이다. 그림 9는 3조파분이 기본파의 50%, 5조파분이 기본파의 50%일때 입력 파형 및 출력 파형을 보여주고 있으며, 1 주기의 샘플링 수는 N=12일 때이다. 디지털 필터를 거친 출력의 주파수 응답(c)에서는 기본파 성분만이 추출되고 있음을 알 수 있다.

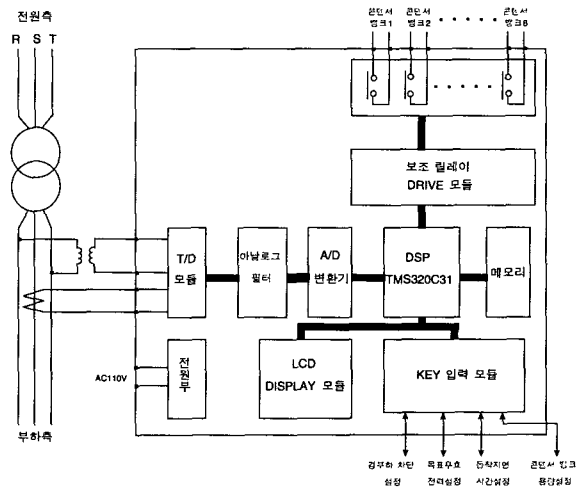


그림 7. 무효전력 제어기의 하드웨어 블록도.
Fig. 7. Hardware block diagram of reactive power controller.

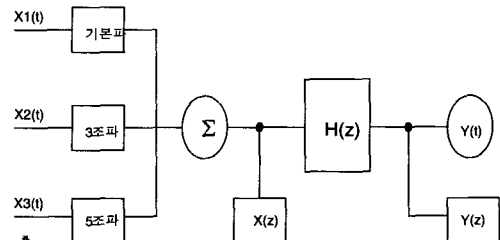


그림 8. 필터특성 측정을 위한 시뮬레이션 블록도.
Fig. 8. Simulation block diagram for measuring of filter characteristic.

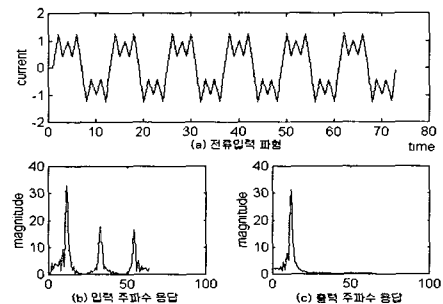


그림 9. 입력파형의 크기변화에 따른 Hr(z)의 주파수 응답(3조파 : 50%, 5조파 : 50%일 때).
Fig. 9. Frequency response of Hr(z) according to the magnitude of input.

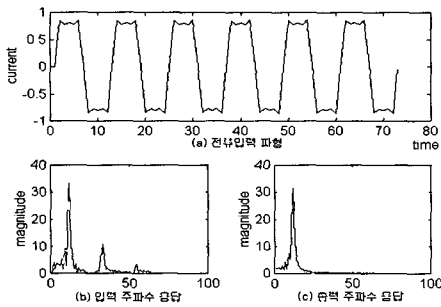


그림 10. 입력과형의 크기변화에 따른 $H_r(z)$ 의 주파수 응답(3조파 : 30%, 5조파 : 10%일 때).
 Fig. 10. Frequency response of $H_r(z)$ according to the magnitude of input.

그림 10은 3조파 성분이 기본파의 30%, 5조파는 10% 일 때의 입력에 대한 시뮬레이션 결과를 보여주며, 그림 9와 마찬가지로 고조파 성분이 제거되고 있음을 보여주고 있다.

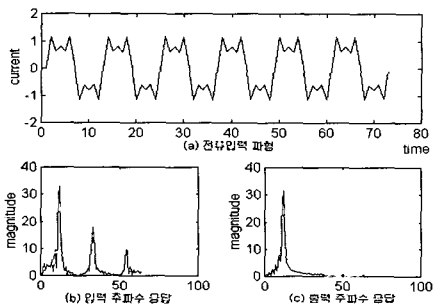


그림 11. 입력과형의 크기변화에 따른 $H_i(z)$ 의 주파수 응답(3조파 : 50%, 5조파 : 30%일 때).
 Fig. 11. Frequency response of $H_i(z)$ according to the magnitude of input.

그림 11은 허수부 성분을 얻기 위한 전달함수 $H_i(z)$ 를 사용하여 필터링한 결과를 보여주고 있으며 그림 9에서 사용한 $H_r(z)$ 의 결과와 같은 주파수 응답을 얻을 수 있었다. 결론적으로 그림 9-그림 11의 결과에서 3조파, 5조파의 성분은 크기에 관계없이 제거되고 기본파 성분만이 잘 추출되고 있음을 알 수 있다.

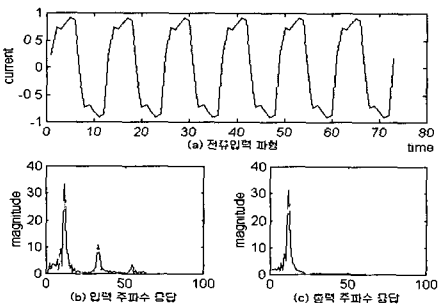


그림 12. 입력과형의 phase 변화에 따른 $H_r(z)$ 의 주파수 응답(3조파 : 30%, 5조파 : 10%일 때).
 Fig. 12. Frequency response $H_r(z)$ according to the phase of input.

그림 12에서는 고조파분의 위상변위에 따른 $H_r(z)$ 의 주파수응답을 시뮬레이션 하였으며 3조파는 기본파의 50%, 5조파는 10%일 때이다. 출력의 주파수 응답(c)에서는 고조파분의 위상변화에 관계없이 필터는 고조파분을 제거하고 있음을 보여주고 있다.

2. 무효전력 제어기의 동작시험

제작되어진 무효전력제어기의 알고리즘 및 하드웨어의 성능을 검증하기 위하여 표 1에서 설정한 제어기 시험조건을 사용한다. 동작시험은 크게 초기설정된 변수를 이용하여 알고리즘을 수행하는 과정과 목표량에 의한 제어과정으로 나누어 생각할 수 있다.

1) 적용 계통의 선정과 제어변수의 산출

성능실험을 위하여 콘덴서뱅크 용량이 100[KVA] × 8인 계통을 그림 13과 같이 선정하였으며, 콘덴서 투입시의 동작특성 시험을 위한 시험조건은 표 1과 같다.

표 1. 제어기의 시험조건.

Table 1. Test condition of controller.

| 항 목 | 시 험 조 건 |
|------------|-----------------|
| 최대 유효전력 | 1000 KW |
| 최소 유효전력 | 100 KW |
| 현재 평균역률 | 0.75 |
| 목표역률 | 0.95 |
| CT비 / PT비 | 300/5, 6600/110 |
| 콘덴서 Bank 수 | 8 |

성능실험을 위한 모의 계통도와 표 1과 같은 시험조건을 제어기에 설정하면 무효전력 제어기는 다음과 같은 알고리즘에 의하여 제어에 필요한 변수값들을 산출하여, 결과적으로 그림 15와 같은 제어영역을 설정하게 된다.

단계 1 : 평균역률이 0.75일 때 최대무효전력 Q를 구한다.

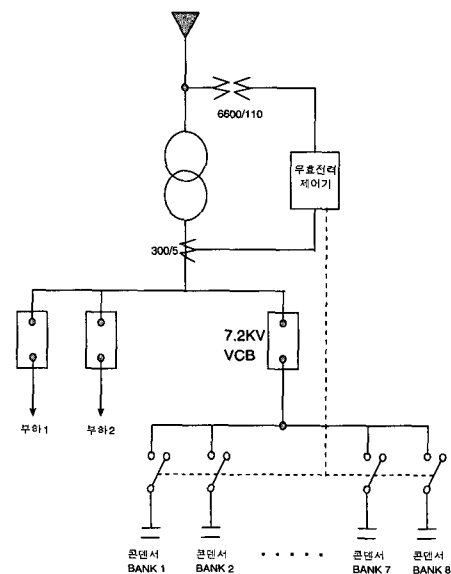


그림 13. 성능실험을 위한 단선도.

Fig. 13. Single line diagram for performance test.

$$\begin{aligned} \text{최대무효전력} &= \text{최대수요전력} \times \sqrt{\frac{1}{\text{평균역률}^2} - 1} \\ &= 882 \text{ [KVAR]} \end{aligned} \quad (19)$$

단계 2 : 목표역률과 최대수요전력에 의해 목표 무효 전력 Q_t 를 구한다.

$$\begin{aligned} \text{목표무효전력} &= \text{최대수요전력} \times \sqrt{\frac{1}{\text{목표역률}^2} - 1} \\ &= 329 \text{ [KVAR]} \end{aligned} \quad (20)$$

단계 3 : 역률 개선에 필요한 콘덴서용량 Q_c 및 단위 콘덴서용량을 구한다.

$$\begin{aligned} Q_c &= \text{최대 무효전력}[Q] - \text{목표 무효전력}[Q_t] \\ &= 553 \text{ [KVAR]} \end{aligned} \quad (21)$$

이때 콘덴서뱅크를 8개 설치한다면, 단위 콘덴서 용량은 약 69[KVA] 정도 이므로 100[KVA]를 선정할 수 있으며, 단계 1, 2, 3으로 부터 그림 14와 같은 부하 벡터도를 결정할 수 있다.

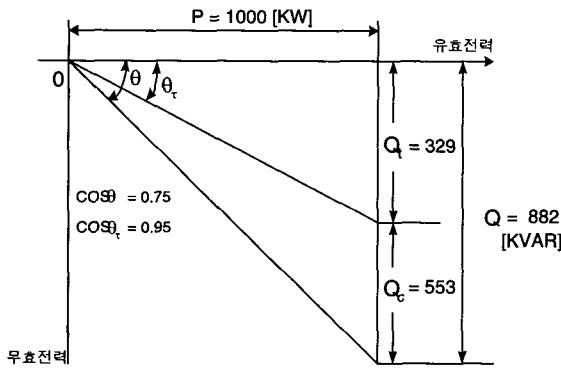


그림 14. 부하제어를 위한 벡터도.
Fig. 14. Vector diagram for load control.

단계 4 : 콘덴서뱅크 용량의 결정에 따라 최종 무효 전력 Q_E 를 얻을 수 있다.

$$\begin{aligned} \text{최종무효전력}[Q_E] &= \text{최대무효전력} - (\text{콘덴서뱅크수} \\ &\quad \times \text{단위용량}) = 82 \text{ [KVAR]} \end{aligned} \quad (22)$$

단계 5 : 무효전력 제어시 필요한 콘덴서 투입, 차단치 및 경부하 차단전력을 계산한다. 투입 무효전력 및 차단 무효전력 계수 a, b는 실제로 투입 및 차단시킬 콘덴서 용량을 결정할 때 사용하는 계수이다. 투입 무효전력 계수 a는 일반적으로 0~0.25의 범위를 갖으며, 차단 무효전력 계수 b는 0.02~0.25의 범위를 갖는다.

a) 콘덴서 투입시의 무효전력 설정

일반적인 경우에는 콘덴서 투입치는 목표 무효전력과 같게되나, 전기요금을 절약하기 위하여 지상 무효전력을 적게하지 않아도 되는 경우에는 a=0 으로 설정할 수 있다. a=0 인 경우에는 콘덴서 투입치가 0이 된다.

$$a \leq \frac{\text{목표무효전력}}{CPT_{\text{비}}} = \frac{329}{\frac{6600}{110} \times \frac{300}{5}} \approx 0.09 \quad (23)$$

투입치 무효전력 계수에 의해, 투입치는 다음과 같이 결정된다.

$$\begin{aligned} \text{콘덴서 투입치} &= 0.09 \times \frac{6600}{110} \times \frac{300}{5} \\ &= 324 \text{ [KVR]} \end{aligned} \quad (24)$$

b) 콘덴서 차단시의 무효전력 설정

$$\begin{aligned} b &\geq \frac{(\text{단위콘덴서용량} \times 1.2) - \text{투입용량}}{CPT_{\text{비}}} \\ &= \frac{100 \times 1.2 - 324}{\frac{6600}{110} \times \frac{300}{5}} = -0.06 \end{aligned} \quad (25)$$

여기서, 차단치 무효전력 계수 b가 음의 값을 갖는 이유는 진상 무효전력임을 표시한다. 이때 차단치는 다음과 같이 결정된다.

$$\begin{aligned} \text{콘덴서 차단치} &= -0.06 \times \frac{6600}{110} \times \frac{300}{5} \\ &= -216 \text{ [KVAR]} \end{aligned} \quad (26)$$

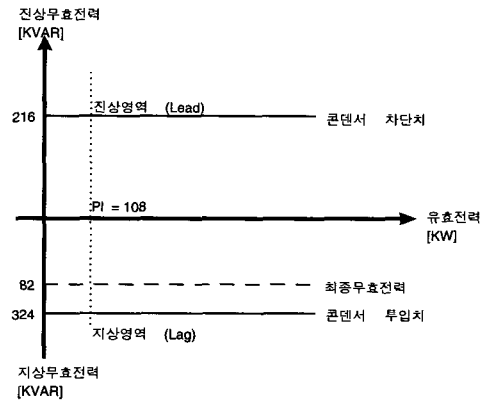


그림 15. 성능시험시 계산되어진 제어영역.
Fig. 15. Control region at performance test.

c) 경부하 차단전력의 설정

경부하시 모든 콘덴서를 차단시킬 유효전력 P_l 는 다음과 같이 얻어낸다.

$$\begin{aligned} U &= \frac{1.2 \times \text{단위 콘덴서 용량}}{CPT_{\text{비}}} \\ &= \frac{1.2 \times 100}{\frac{6600}{110} \times \frac{300}{5}} = 0.03 \end{aligned} \quad (27)$$

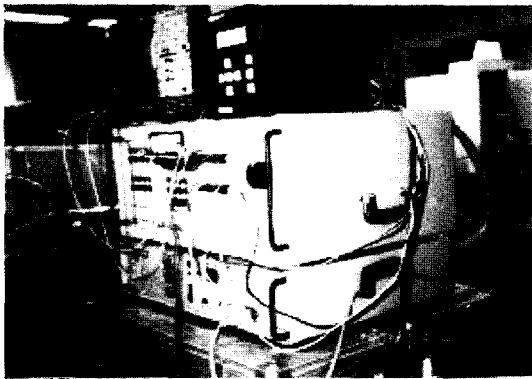
여기서, U는 경부하시 유효전력 계수이다. 그러므로

$$P_l = 0.03 \times \frac{6600}{110} \times \frac{300}{5} = 108 \text{ [KW]} \quad (28)$$

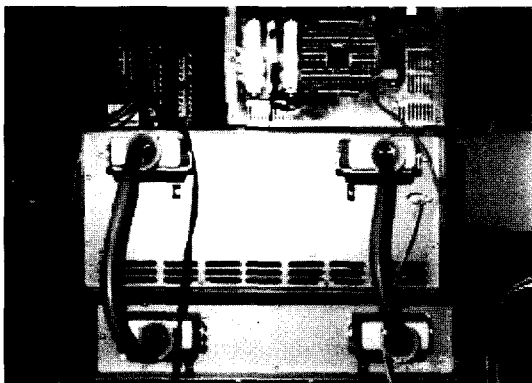
단계 5에서는 콘덴서 투입치, 콘덴서 차단치 및 경부하 차단전력을 사용하여 그림 15와 같이 제어영역을 나타내었다.

2) Cyclic 방식에 의한 콘덴서뱅크의 제어

실제 시험에서는 3상 전류·전압값이 필요하므로 그림 16과 같이 릴레이 시험장비(FREJA RTS21D)를 사용하였으며, 인가되는 전류·전압값의 크기 및 위상을 변경 시킴으로써 무효전력값을 변화시켰다.



(a) 무효전력 제어기의 시험모습(정면)



(b) 무효전력 제어기의 시험모습(후면)

그림 16. 성능시험중인 제어기와 시험장치의 사진
Fig. 16. The photographs of test apparatus and controller during performance test.

즉, 3상 전원장치의 전류 크기 및 위상을 조정하여 역률값을 변화시킴으로써 무효전력의 크기를 조절하는 효과를 얻을 수 있다.

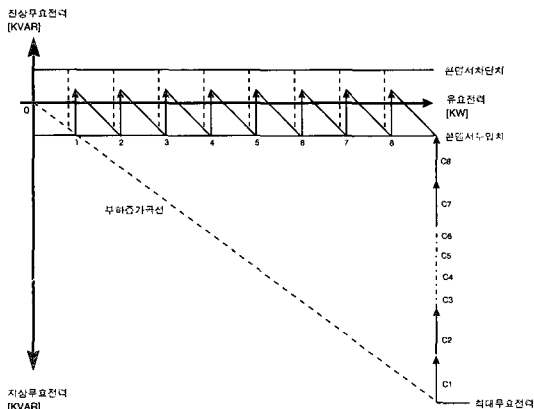


그림 17 콘덴서뱅크의 투입 및 차단 동작.
Fig. 17. Closing and trip operation of condenser bank.

무효전력을 증가시켜 콘덴서뱅크의 투입치를 넘으면 그림 17의 1지점에서 콘덴서 C1이 투입된다. 만약 부하의 증가에 따라 계속해서 무효전력이 증가한다면 C2~

C8까지 순차적으로 콘덴서뱅크가 투입되어지며, C1~C8은 콘덴서뱅크가 보상시킨 지상 무효전력량이라 볼 수 있다.

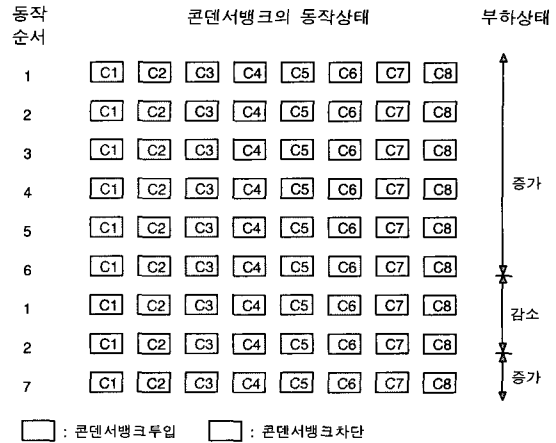


그림 18. 콘덴서뱅크의 cyclic 제어 결과.
Fig. 18. Cyclic operation of condenser bank.

투입 및 차단시 콘덴서 뱅크의 cyclic 동작을 그림 18에 나타내었다. 반대로 부하가 감소하여 진상 무효전력이 콘덴서 차단치를 넘어서는 경우 cyclic 방식에 의해 C1 콘덴서뱅크가 차단되고 있음을 알 수 있다. 그림 18의 결과는 제어기의 성능시험을 위하여 그림 13 및 표 1에서 설정한 조건에서 시행되어 졌다. 현재 역률 0.75 및 목표역률 0.95일 때 단계 1, 2, 3에서 구한 투입 용량은 553[KVAR]이며, 100[KVA] 6개의 콘덴서 뱅크가 투입지연시간 간격으로 연속적으로 투입되고 있음을 보여주고 있다.

또한 디지털 제어기가 역률을 개선하기 위해 출력신호를 발생한 후 보조릴레이의 점점 개구에 소요되는 시간은 순시동작(50ms 이하)을 만족시킨다. 그러나 콘덴서뱅크가 투입, 차단되어 질 때, 무효전력 제어기의 시스템 변수인 Time_Delay 를 조정하여 투입 및 차단 지연시간을 설정할 수 있으며 Default는 1분 간격으로 제어되고 있다.

V. 결론

본 연구에서는 역률개선용 콘덴서뱅크를 자동제어 함으로써 무효전력을 보상시키는 무효전력 제어기를 구현하였다. 제어기는 디지털 필터링을 사용한 무효전력 제어 알고리즘을 중심으로 하는 소프트웨어와 실시간으로 제어를 가능토록 하기 위해 신호처리 전용 DSP 칩을 사용하여 하드웨어를 구현하였다. 실제 부하단의 전류·전압량은 고조파를 포함하고 있기 때문에 사용되어진 디지털 필터의 성능을 시뮬레이션 통해 검증하였으며, 3상 전류·전압을 인가하여 무효전력 제어기의 동작과정을 시험하였다. 연구를 수행함으로써 얻은 결과는 다음과 같다.

1) 제어량인 무효전력 및 역률값을 얻어내기 위해 기본 파 성분을 추출하여야 하며, 사용되어진 디지털 필터는 중첩되어진 고조파 성분을 제거하였다. 특히 필터의

전달함수 $H_r(z)$, $H_i(z)$ 를 이용함으로써, 포함된 고조파 성분의 크기 및 위상변위에 관계없는 주파수 응답을 얻을 수 있다.

2) 실시간제어가 가능토록 신호전용 DSP 칩을 사용하여 하드웨어와 멀티태스킹 기법이 가능토록 실시간 커널을 사용하여 시제품을 제작하였다.

3) 3상 전류·전압의 크기 및 위상을 변화시켜 부하단의 무효전력을 인가함으로써, 제작되어진 알고리즘을 검증하였으며 제어기의 동작상태를 확인하였다.

또한 본 연구의 결과를 이용하여 콘덴서뱅크의 균제어를 가능케 하는 지능형 제어기의 구현에 대한 연구가 향후 진행될 것으로 생각된다.

참고문헌

[1] K. H. Abdul-Rahman, "A fuzzy-based optimal reactive power control," *IEEE Trans. Power Systems*, vol. 8, no. 2, pp. 662-668, May, 1993.
 [2] A. G. Phadke, M. Ibrahim, "Fundamental basis for distance relaying with symmetrical components,"

IEEE Trans. Power Apparatus and Systems, vol. PAS 96, no. 2, pp. 635-643, March/April, 1977.
 [3] 우천희, "선로보호형 거리계전 방식에서 뉴로-퍼지 네트워크를 이용한 고장판단 연구," 대한전기학회 논문지, 제 42권, 제 8호, pp. 61-73, 1993, 8.
 [4] P. M. Embree, B. Kimbie, *C Language Algorithms for Digital Signal Processing*, Prentice-Hall International INC., 1991.
 [5] 현대중전기, *Automatic Power Factor Controller Instruction Manual*.
 [6] Texas Instruments, *TMS320 Floating-point DSP optimizing compiler user's guide*, Feb., 1995.
 [7] Texas Instruments, "TMS320C3X C source debugger user's guide," 1994.
 [8] J. J. Labrosse, "The real-time kernel," R&D Publications, Lawrence, Kansas.
 [9] Bahram Shahian, Michal Hassul, "Control system design using MATLAB," Prentice Hall International INC.



우 천 희

1985년 연세대 전기과 졸업. 동대학원 석사(1993). 동대학 박사과정(1995년~현재). 1985년~1995년 현대중공업 중앙연구소 선임연구원. 1995년~현재 명지전문대학 전기과 조교수. 관심분야는 시스템제어, 디지털보호

계전기, 마이크로프로세서 응용.



강 신 준

1992년 연세대 전기과 졸업. 동대학원 석사(1994). 동대학 박사과정(1994~현재). 관심분야는 지능형제어.



이 덕 규

1987년 연세대 전기과 졸업. 동대학원 석사(1989). 동대학 박사과정(1989년~현재). 1991년~1996년 쌍용자동차 기술연구소 주임연구원. 관심분야는 Emergent control, 지능형제어.

우 광 방

제어·자동화·시스템공학회 논문지 제 3권 제 2호 참조.

이 성 환

제어·자동화·시스템공학회 논문지 제 4권 제 1호 참조.