

정역전이 가능한 SCR 서보증폭기에 관한 연구

안 병 원* · 박 상 길**

*한국해양대학교, **부산수산대학교

(1994년 12월 19일 접수)

A Study on the Reversible SCR Servo Amplifier

B.W. Ahn*, S. K. Park**

*Korea Maritime University, **National Fisheries University of Pusan

(Received December 19, 1994)

Abstract

Many industrial servo amplifiers employ power transistor as output device. Thyristor converters are not adopted to drive servo motor, although thyristor is superior to power TR in power rating, noise immunity, price, and size. The reason is, thyristor has no ability of self turn-off. Here in this paper line commutation, in which thyristor is turned off naturally since cathode voltage is higher than anode as time goes by, is employed to turn on thyristor with a delicate sequence. We developed thyristor servo amplifier which does not cause any damage on thyristor because it is designed to prevent triggering the two SCRs in the same arm simultaneously. And it was made clearly how to trigger SCR without any power line shorting and also harmonic analysis is carried out with the aid of FFT analyzer and proved that it can be used even severe reactive load. The designed circuit operated as a good DC amplifier in conventional servomotor and the results can be used as a position control system application.

Key word : SCR Servo amplifier(SCR서보증폭기), Servo amplifier(서보증폭기)

Commutation principle(전류원리), Distinction principle(소호원리)

1. 서 론

최근 산업에 응용되는 서보 증폭기는 전류의 단속이 쉬운 트랜지스터가 압도적으로 많이 이용되고 있다. SCR은 트랜지스터에 비해 동일한 가격의 경우 용량이 있어서는 비교가 안될 정도로 우세하다. 또한 대용량의 서보모우터의 경우도 요구되는 정역회전의 특성은 10Hz를 넘어서지않고 있어서 60Hz의 교류를 이용하여 선전류(Line commutation)를 응용할 수 있는 가능성을 보여주고 있음에

도 불구하고, 정역전이 필요한 직류서보모우터에는 SCR을 이용하지 않고 있는 실정이다.

정회전 속도제어의 경우는 컨버터의 형식으로 SCR위상제어 방식이 이미 광범위하게 응용되고 있다. 그럼에도 불구하고 정역전이 가능해야 하는 서보모우터의 드라이브에는 SCR을 채택치 않고 있는 단적인 이유는 정회전되는 모우터를 역회전하기 위해 역회전측의 SCR을 트리거하는 순간 브리지를 구성하는 SCR의 상하측이 모두 도통되어 전원을 단락하는 위험을 내포하고 있기 때문이다.

이렇게 될 경우 SCR은 당장에 소손이 되게 된다. SCR은 트리거되어 도통된 이후 이를 소호하는 것이 용이하지않고, 현재까지 SCR브리지를 트리거하는 방식을 적절히 고안하지 못하였기 때문에 직류서보 증폭기에 SCR이 응용되지 않고 있는 것이다. 본 연구에서는 이중 브리지 컨버터의 점회로를 새로이 고안하여, 어떠한 순간에도 브리지를 구성하는 SCR의 상하부 암이 동시에 트리거되는 것을 방지하는 SCR서보 증폭기를 개발하였다. 브리지의 상하 SCR을 동시에 도통함이 없이 회로를 트리거할 수 있는 이유를 해석하였고, 시험제작된 서보 증폭기의 출력을 FFT Analyzer로 분석하여 동특성을 관찰하였고, 소호능력을 판별하기 위해 용량부하를 구동할 수 있음을 실증하였다.

직류 전동기를 부하로 장기간 구동시킨 후, 직류 전동기의 정류자와 브러시를 분해하여 이들 상태를 점검하여 보았고, 이들의 마모를 줄이는 데는 데드존(Dead zone)을 주는 것이 적절함을 알 수 있었다.

2. SCR 서보 증폭기의 작동원리

2.1 출력회로의 구성

정역전이 가능한 SCR서보 증폭기를 실현하기 위해서는 출력터미널부에 정역전 출력이 가능하여야 하므로 주 SCR은 그림1과 같은 회로를 구성하게 된다.

정회전 동작에서는 Q_{22} , Q_{22}' 가 도통되거나 Q_2 ,

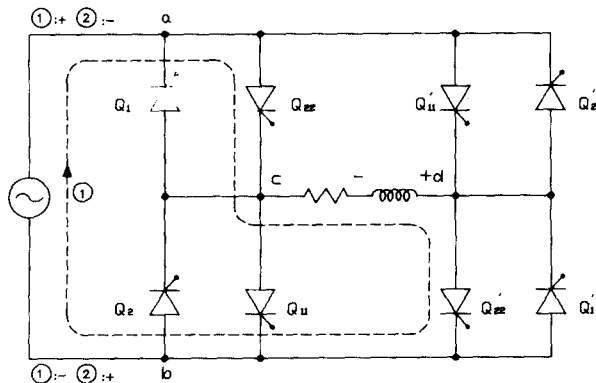


Fig.1 Main SCR circuit

Q_2' 가 도통되어야 하며,역회전 동작시에는 Q_1' , Q_1 이 도통되거나 Q_{11}' , Q_{11} 이 도통되어야 한다. 그림1의 a,b점의 전압부호가 ①과 같을 때 Q_{22} , Q_{22}' 이 도통되어 있는데, 이때 서보증폭기의 입력이 반대 부호로 반전된다면 출력전압의 신호도 반전되어야 할 것이다. 그러나 단락을 막기 위해서는 Q_{22} , Q_{22}' 가 소호가 되고, 전원의 부호가 ②와 같이 되었을 때 트리거하도록 해야 할 것이다. 왜냐하면 Q_{22} , Q_{22}' 이 도통되어 있을 때 전원의 부호가 ①과 같은 순간에 출력의 부호를 바꿀 목적으로 Q_{11}' , Q_{11} 을 트리거하게 되면, 전원이 단락되므로 전원의 부호가 동일한 순간에는 역전운전을 위한 트리거를 하지 않도록 고안하였다.

2.2 위상제어회로

그림2에서 정역제어 입력이 들어오면 입력신호의 부호에 따라 비교기(comparator)의 출력①가 결정되고 이 출력 ①는 영점검출(zero crossing detector)의 출력을 클럭으로 하는 D플립-플립 회로에 입력되게 된다. 플립플롭의 출력은 게이트에 입력되어 결과적으로 전원의 부호가 바뀌지 않는 이상 트리거 대상 SCR을 변화시키지 않도록 하였다. ②신호는 적절한 위상에서 SCR이 트리거되도록 하는 신호로서, 입력신호의 강도가 크면 클수록 점회각이 짧아지도록 하여 보다 많은 전력이 출력되도록 하고, 입력신호가 작으면 점회각이 길어져서 전력출력이 작아지도록 하였다.게이트의 출력이 광 SCR의 게이트에 가해지도록 하여 광 SCR을 트리거하여서 주 SCR을 트리거하도록 하였다. 이상과 같은 트리거방식을 시간적으로 표시해 보면 그림3과 같이 표시될 수 있다.

2.3 게이트 회로

주 SCR의 게이트회로는 그림4와 같이 광결합(optical coupling)을 하여 직류적으로 서로 분리되도록 하였고, 주 SCR의 보호를 위한 스너버회로의 일부를 분기한 형태로 하여 게이트회로를 동시에 구성하도록 하였다.

2.4 평균전압과 실효전압

단상교류전원에서 저항부하를 연결하여 정류하

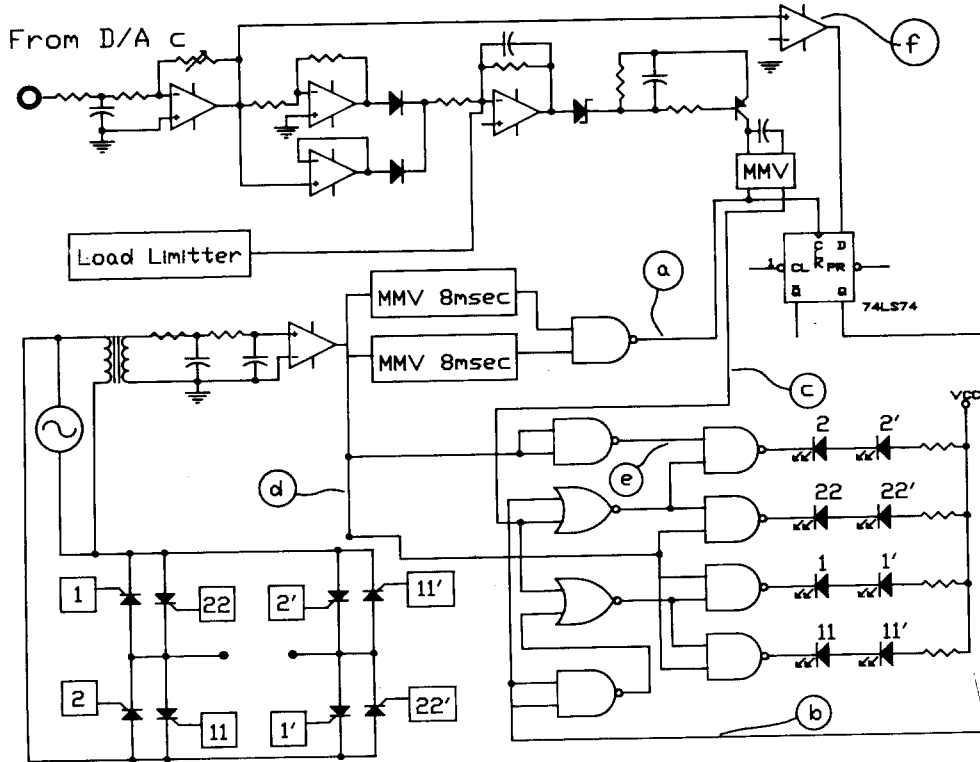


Fig.2 Trigger pulse generation circuit

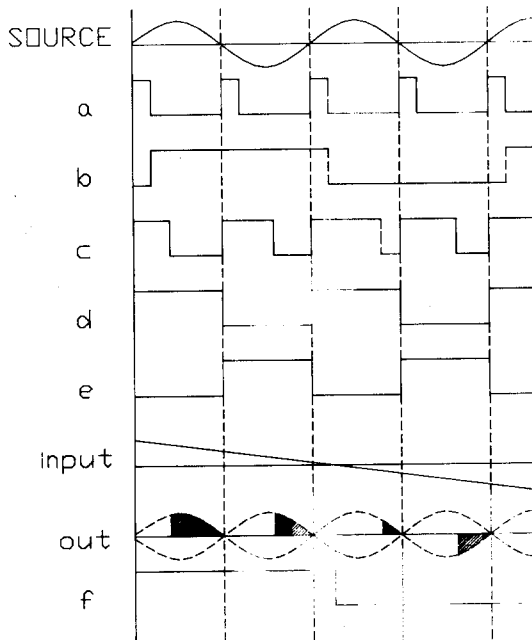


Fig.3 Timing diagram

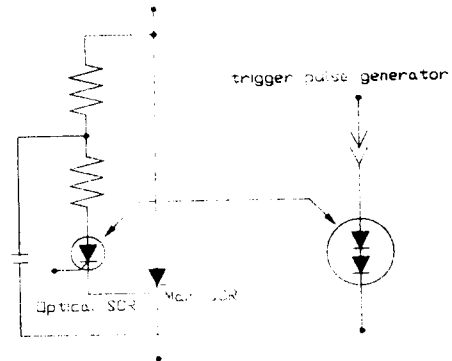


Fig.4. Main SCR trigger circuit

여 직류전압을 얻을 경우 그림 8에서 입력전압의 정(+)의 반주기 동안에 SCR Q₂₂, Q_{22'}의 애노드는 캐소드에 대하여 정(+)이며, 순방향으로 바이어스되어 전류가 흐를 수 있으며, SCR Q₂₂, Q_{1'}가 $wt = \alpha$ 에서 점호될 때, SCR Q₂₂, Q_{22'}는 도통되고, 입력전압은 부하 양단에 나타난다. 입력전압이 $wt = \pi$ 에서 부(-)로 시작될 때, SCR Q₂₂, Q_{22'}의 애노드는 캐소드에 비하여 부(-)이고, SCR Q₂₂,

Q_{22}' 는 역방향으로 바이어스되어 소호된다. 또 Q_2 , Q_{2}' 의 아노드는 캐소드에 대하여 정(+)이며, 순방향으로 바이어스되어 전류가 흐를 수 있으며, $wt = \pi + \alpha$ 에서 점호될 때, SCR Q_2 , Q_{2}' 는 도통되고, 입력전압은 부하 양단에 나타난다. 그림3은 컨버터의 동작영역을 나타내며, 여기서 출력전압과 전류는 하나의 극성을 갖는다. V_m 이 최대 입력 전압일 때, 한 주기 동안 평균 출력 전압 V_{dc} 는

$$\begin{aligned} V_{dc} &= 2 \times \frac{1}{2\pi} \int_{\alpha}^{\pi} V_m \sin wtd(wt) \\ &= \frac{V_m}{\pi} (1 + \cos \alpha) \end{aligned} \quad (1)$$

이며, α 를 0부터 π 까지 변화시킴으로써 V_{dc} 를 V_m 부터 0까지 변화시킬 수 있다. 한 주기 동안 평균 출력전압은(1)식에서 $\alpha=0$ 일 때 최대로 되며, 최대전압 V_{dm} 은 $\frac{2V_m}{\pi}$ 이 되며 입력전압이 110V인 경우 V_{dm} 은 약 91V이다.

또 실효출력전압은 식(2)와 같다.

$$\begin{aligned} V_{rms} &= \left[\frac{1}{2\pi} \int_{\alpha}^{2\pi} V_m^2 \sin^2 wtd(wt) \right]^{1/2} \\ &= V_m \left[\frac{1}{2\pi} (\pi - \alpha + \frac{\sin 2\alpha}{2}) \right]^{1/2} \end{aligned} \quad (2)$$

따라서 통상적인 부하 전동기의 시정수영역내에서는 전원의 주기가 매우 짧으므로 직류증폭기의 기능을 충분히 할 수 있음을 알 수 있다.

3. 소호원리

서보 증폭기의 부하성분은 주로 R과 L(유도성) 부하이다. 드물게 용량성(Capacitance) 부하를 생각할 수 있으나 용량성 부하는 진상의 전류를 회로 내에 발생시키므로 진상이 되는 기간만큼 SCR이 소호할수 있는 시간이 길어지므로 점호실패에 대한 대책마련의 필요성이 없다. 단적으로 저항성 부하에 비해서도 더욱 확실한 SCR의 소호가 보장이 되게 된다.

그러나 유도성 부하의 경우 지상전류가 회로내에 발생되므로 SCR의 소호기간이 그만큼 줄어들게 되므로, 서보 증폭기의 대부분의 부하인 전동기를 가동시킬때는 평범한 방식으로 SCR을 점호할 수가 없게 되는 것이다.

본 연구에서 고안된 trigger 방식은 그림5에서와 같이 ①의 전원 반주기 기간동안 Q_{22} , Q_{22}' 가 도통된다면 그다음 전원의 반주기 ②의 기간 동안은 Q_1 과 Q_{2}' 은 절대로 firing을 하지 않는 방법을 취하는 것이다. 또한 Q_2 , Q_{2}' 가 전원의 반주기 동안 도통된 이후에는 그 다음 전원의 반주기 동안은 Q_1 과 Q_1' 을 절대로 firing하지 않는 것이다.

가장 극단적으로 SCR의 소호가 힘든 경우를 보게 되면 Fig.6과 같은 등가 회로에서 L이 R의 값에 상대적으로 클 경우이다.

그림5에서 ①의 기간동안 Q_{22} 와 Q_{22}' 가 도통되어 있다. 여기서 i_r 가 흐르기 시작하는 시점을 중심으로 부하전류에 관한 식을 유도하면, 회로는 식(3)이 성립하게 된다.

$$E \sin wt = \frac{L di}{dt} + iR \quad (3)$$

양변을 Laplace 변환하여 i 에 관해서 정리하면 식(4)가 성립한다. 점호각 α 를 0한 경우가 전류의 지연이 가장크고, 전원의 직류성분이 0이므로 초기조건을 모두 0으로 둘 수 있다.

$$i = \frac{Ew}{L(s + \frac{R}{L})(s^2 + w^2)} \quad (4)$$

식(4)를 Laplace역변환하게 되면 식(5)과 같이 $i(t)$ 를 구할 수 있다.

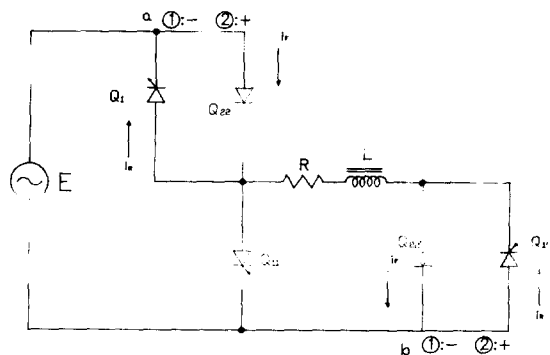


Fig.5 The commutation principle of the designed circuit

$$i(t) = \frac{Ew}{L} \left\{ \frac{e^{-\frac{R}{L}t}}{w^2 + \left(\frac{R}{L}\right)^2} + \frac{1}{w} \frac{1}{w^2 + \left(\frac{R}{L}\right)^2} \sin(wt - \rho) \right\} \quad (5)$$

단, $\tan \rho = \frac{Lw}{R}$

SCR의 소호를 방해하는 요인이 소호시간을 확보할 수 없는 지상의 전류가 ②의 기간동안 존재할 경우인데, 가장 극단적으로 소호를 방해할 경우를 식(5)에서 찾아보면 ρ 가 가장 클때가 될 것이다.

식(5)에서 식(6)의 항은 정상상태에서는 0이 되나 악조건의 경우 0이 될수 없으며 가장 심한 경우가 $t=8.33\text{msec}$ 정도 일때이다. 그리고 서보 모터보다 더욱 소호하기가 곤란한 경우가 코일의 경우인데 지구상에서 상업적으로 실현가능한 정도가 Q(Quality factor) 지수로 300미만이다.

$$\frac{e^{-\frac{R}{L}t}}{w^2 + \left(\frac{R}{L}\right)^2} \quad (6)$$

$$Q_f = \frac{Lw}{R} < 300$$

따라서 $\frac{R}{L} > 0.3$ 의 관계가 성립하므로 식(6)이 가질수 있는 가장 큰 값은 0.00026정도로 식(7)에 비해 무시가능한 값이 된다.

$$\frac{1}{w \sqrt{w^2 + \left(\frac{R}{L}\right)^2}} = 0.165 \quad (7)$$

그러므로 식(5)는 식(8)로 등가가 가능하며, $i(t)$ 의 값이 0보다 작아서 소호 가능한 기간은 식(8)이 0보다 작은 때부터 다시 $wt=2\pi$ 가 될때이다.

$$i(t) = \frac{1}{w \sqrt{w^2 + \left(\frac{R}{L}\right)^2}} \sin(wt - \rho) \quad (8)$$

Q의 지수가 현실적으로 가장 클 경우라도 Q는 300을 넘지 못하므로 Phase shift는 과도 상태에서도 90도를 넘을 수가 없다. 따라서 소호기간은 위상으로 $\frac{\pi}{4}$ 이상이며, 시간으로 8.33msec이상이므로 저속 SCR의 소호시간인 수십 μsec 보다는

100배이상 긴 소호시간을 보장하므로 어떠한 서보전동기라도 본연구에서 고안된 트리거방식에 의한다면 안정하게 구동할 수 있다.

4. 실험 및 결과고찰

주파수 특성을 조사하기 위해 제어입력으로서 는 정상편차(off-set) 조절이 가능한 정현파발전기를 이용하였으며, 출력 터미널에는 50 Ω 저항을 삽입하여서 이 부하저항과 병렬로 FFT Analyzer를 접속하여 부하측 전압의 조화분석을 하였다. 아울러 2Hz이상의 신호에 대해서는 true rms전압계를 이용하여 실효성분의 평균치 출력도 아울러 감시하였다. 회로구성에 사용된 SCR의 경우는 보급형으로 소호시간이 10 μsec 이상인 경우도 실험이 가능하였다. 모든 OP Amp는 LM741을 이용하였으며, 비교기는 LM311정도의 소자로서도 기능을 충분히 발휘할 수 있었다. 단안정멀티바이브레이터는 74LS123을 사용하였다. 각부분의 펄스파형은 오실로스코프로 관측하여 그림5와의 상이 여부를 확인하였다. 유도성부하의 소호가능을 확인하기 위해서 100V, 1KVA용량의 트랜스포머를 부하로 하여 가동하였으며, 100V, 400W급 직류전동기를 구동하여 보았다.

실제로 실기에 응용되기 위해서는 서보 회로망 내에서 Error Signal이 0에 근접할 경우 서보 증폭기의 출력을 0로 하는 데드존을 주어야 직류서보 증폭기의 브러시와 정류자의 수명을 연장시킬수 있다.

본 연구에서는 이 데드존을 가변시킬 수 있도록 설계했으나 실험A에는 $\pm 1.3\text{Volt}$ 이내로 조정하였다. SCR 트리거용 LED의 전원측은 지연회로와 접속되도록 하여, 전원투입시 OP Amp회로와 단안정멀티바이브레이터회로등이 정상상태로 세팅되도록 50msec의 시간지연후, LED에 전원이 접속되도록 하였다.

그림6은 서보 증폭기의 입출력 특성을 나타내고 있다. 데드존은 $\pm 1.3\text{Volt}$ 로 조정되었으며, 출력전압은 2.4Volt부근의 입력으로 포화가 되었다. 그러나 이 값은 입력 증폭기의 이득조절로 포화전압과 데드존은 조절가능하다.

그림7은 입력전압으로 1.5Vrms의 정현파를 가하였을 경우의 저항성 부하에서의 기저파(Fundamental Component) 성분만의 출력특성을 나타내고 있다. 서보증폭기의 양단 선간전압은 95-105V부근을 유지시켰다. 입력 주파수 성분이 30HZ부근까지는 비교적 평탄한 특성을 유지하였고, 30HZ-60HZ부근까지는 60HZ 부근까지 서서히 감소추세를 보이다가 60HZ에 달하여서는 전원측과 입력측이 In Phase가 되면 최고치를 보이다가 Out of phase가 되면 최소치를 보이고 있는 등 불확정 특성을 보였다. 60Hz 이상의 입력에 대해서는 급격히 출력이 감소하는 추세를 보이고 있

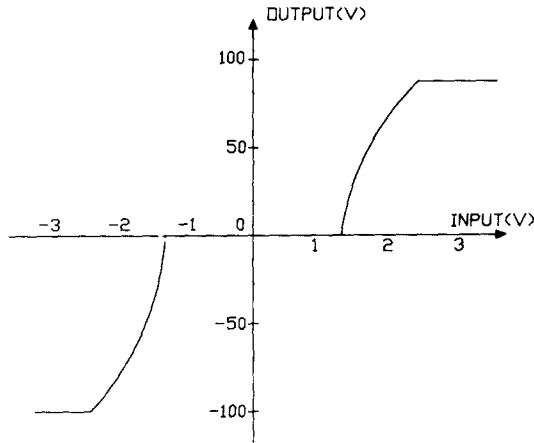


Fig. 6 Results of the input output characteristic of the servo Amp.

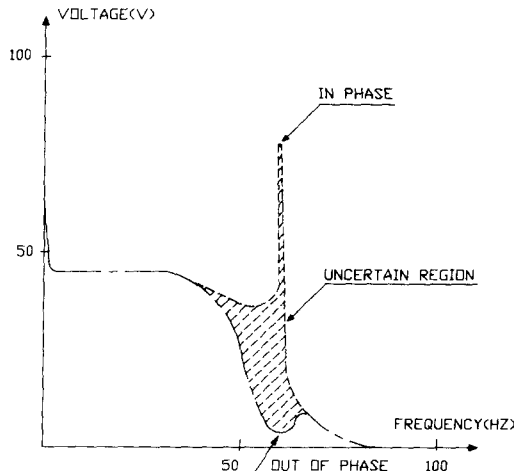


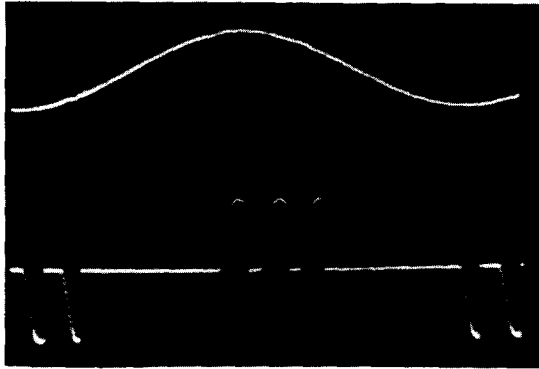
Fig. 7 Sinusoidal input output voltage vs. fundamental components characteristics

다. 입출력 특성에서 0-30Hz 부근의 입력에 대해서는 직선적인 특성을 보이지는 않으나, 비교적 선형특성을 유지하고 있었다. 직선적인 특성이 어려운 이유는 위상제어에 의해 정현파를 제어하게 되므로 제어각과 출력전압이 직선적인 특성을 근본적으로 가지지는 않는 이유 때문이다. 그러나 폐회로 루우프 내에서 이 정도의 비직선특성은 큰 문제가 되지 않을 것으로 추정한다. 주파수 특성을 보게 되면 30Hz 정도의 입력에 대해서는 충분히 추종하는 동특성을 유지하였다. 그러나 40Hz 이상에서는 60Hz를 조금 넘어서까지 위상의 Phase Shift 여부에 따라 심한 출력전압의 변동을 보였다. 60Hz에서는 극단적인 경향을 보였는데 입력과 전원의 In Phase와 Out of Phase와에 따라 0부근의 최저치와 80Volt 부근의 최대치 사이의 출력이 관측되었다. 즉 입력전압이 정인데 전원이 역일 경우라도 트리거 순서에 따라 적절한 순서에 입각해 있으면 전전력의 공급이 가능해질 것이다. 그러나 사실상 전원이 반주기 씩을 건너뛰어서 출력의 방향을 변환시키는 회로방정식으로서 In Phase와 out of Phase가 분명히 존재하게 된다. 따라서 경우에 따라 그림7과 같이 불확정 영역이 필히 존재하게 된다.

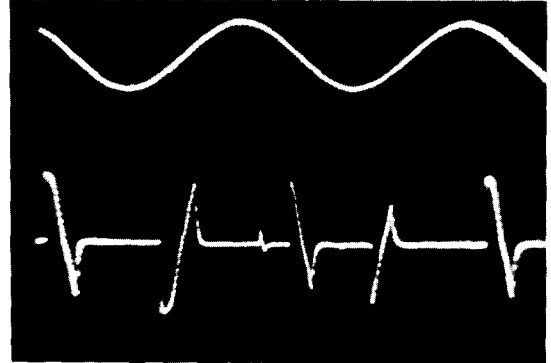
그러나 이 영역은 적어도 30Hz이상의 입력 주파수에 따라 이 영역이 존재하게 되므로 기계적 관성이 큰 대형 직류전동기를 제어대상으로하는 본 연구에서는 30Hz의 입력에 대한 추종은 사실상 요구되지 않는다고 보아도 될 것이다. 따라서 현재의 동특성만으로도 제어대상의 동특성을 충분히 확보하고 있다고 보아야 할 것이다.

그림8은 입출력 전압파형을 오실로스코프로 관측한 파형이다. (a)는 입력이 5Hz로 정,역회전할 경우이고(b)는 10Hz로 정,역회전할 경우이다.

그림9는 서보 증폭기의 출력전압을 주파수성분에 따라 FFT분석한 선도이다. 그림에서와 같이 40Hz 이하에서는 기저파의 성분값이 제일 큰 값이어서 출력전압은 입력에 잘 추종함을 알 수 있다. 60Hz의 경우 60Hz의 값이 제일 크나 120Hz, 180Hz의 고조파 성분이 큰 값으로 관측되는데, 이것은 한전 측의 변압기, 발전기의 특성에 의해 전원이 왜곡(distortion) 되었기 때문으로 추정된다.



(a) input : 5HZ



(b) input : 10HZ

Fig. 8 Input - output voltage wave forms
(up : 2 v/div down : 100v/div)

그러나 70Hz의 경우는 추종불능임을 나타내고 있다. 즉 전원주파수 보다 더 큰 값이나 전원주파수에 근접하는 주파수에 대해서는 동기없이 출력을 얻어내기는 곤란한 것을 여실히 입증하는 것이다. 용량성 부하의 경우 내부저항이 1Ω 이하인 변압기의 일차측을 부하로 하여 실험 해본 결과 트리거 실패는 전혀 발견할 수 없었다. 전동기 부하의 경우 5Hz 정도의 입력에 대해서는 회전자가 부르르 떨면서 입력에 충실한 것을 발견할 수 있었다. 그러나 입력 주파수가 높을 경우 거의 모우터의 출력 측은 정지한 상태였고, 진동음으로 전력이 가해지는 것을 알 수 있었으며, 서보 증폭기는 트리거 실패가 없었다. 따라서 서보 증폭기는 잡음내성 (noise immunity)이 대단히 강한 회로임을 알 수 있었다.

6. 결 론

전원을 단락시킴이 없는 SCR 이중 브리지 트리거 방식을 고안하여, 정역전이 가능한 SCR 서보 증폭기로 구성하여본 결과 다음과 같은 결론을 내릴 수 있었다.

- I. 출력전압의 부호를 변경시킬때 현재의 전원 부호가 반전될 때 까지 도통 상태를 유지시키다가, 전원부호가 반전된 이후 적절한 SCR을 도통 시킴으로서 트리거 실패가 없게 되어, 전원을 단락시키지않게 되고 SCR의 소손을 막을 수 있었다.

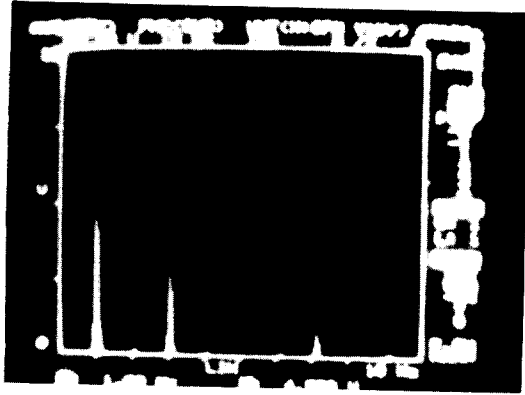
- II. 0에서 약 30Hz 부근까지는 60Hz의 전원으로서는 원하는 전압의 출력을 표현할 수 있었는데, 이는 대형 직류 전동기의 동특성을 충분히 확보할 수 있는 값이다.

- III. 유도성 부하의 경우라도 이미 도통된 SCR을 통하여 유도성부하L에 저장될 수 있는 에너지의 총량은 전원의 반주기 시간과 전원이 파고치값 한계내이므로, 다음 반주기 동안 부호만 반전된 전원 전압과 동일한 반주기의 시간이 존재하므로, 에너지 보존의 법칙에 의해 반드시 다음 반주기 안에 현재 도통된 SCR은 소호되게 되므로 트리거 실패는 존재하지 않는다.

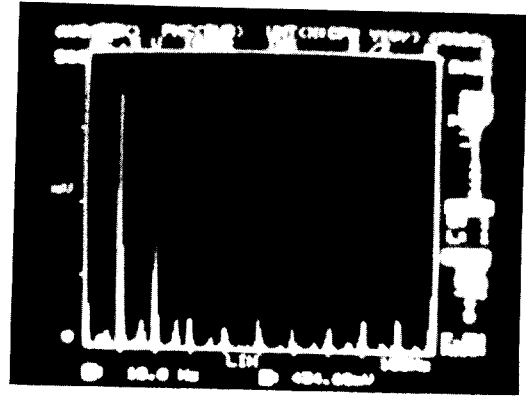
참고문헌

- 1) Pradeep K. Nanda, Paresh c. Sen. Analog and Digital Speed Control of DC Drives Using Proportional - Integral and Integral - Proportional Control Techniques IEEE Transactions on Industrial Electronic, Vol, IE - 34, NO. 2, May 1987 p.227 - 233.
- 2) W.Drury, B.Sc.(Eng), W.Farrer, M. Sc, Ph. D., D. I. C., C. Eng., F. I. E. E., and B. L, Jones, B.Sc., Ph. D., D. I. C., C. Eng. M. I. E. E. Performance of Thyristor Bridge Convertors Employing Flywheeling IEEE Proceedings, Vol. 127. Pt.B. No.4 July 1980, p.268 - 276.
- 3) S. B. Dewan and A.Straughen Power Semicon-

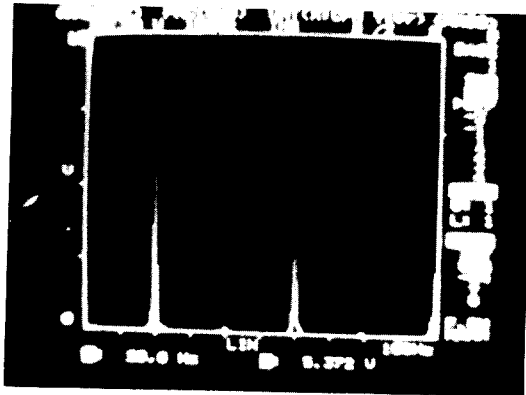
정역전이 가능한 SCR 서보증폭기에 관한 연구



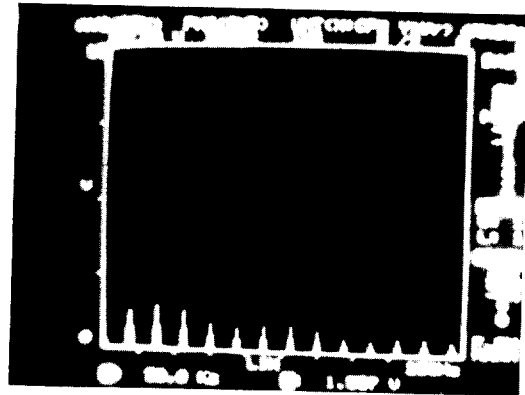
Input : 1Hz



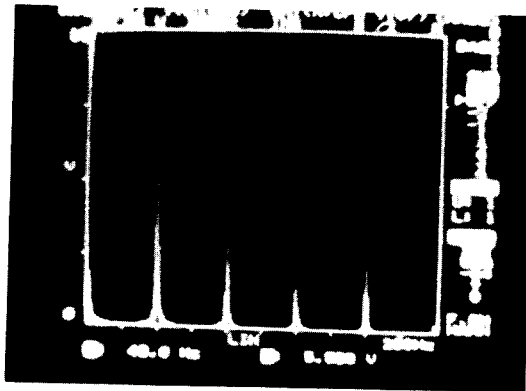
Input : 10Hz



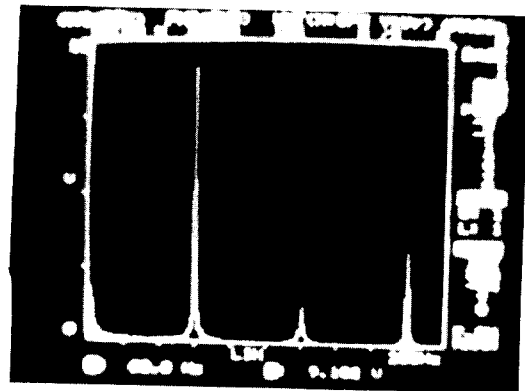
Input : 20Hz



Input : 30Hz



Input : 40Hz



Input : 60Hz

Fig.9 Wave spectrum of the SCR Servo Amp. output voltage

- ductor Circuits Two circuits with Switches and Diodes p.10 - 70.
- 4) Muhammad H.Rashid Power Electronics(Circuit, devices, and applicatiions) Circuit, Device, and Applications Second edition p.137 - 189
- 5) 안 병원, 노 창주, 박 상길 학습이 가능한 용접추적 장치 개발. '94 대한전기학회 하계학술대회 논문집 B p.1067 - 1069.