SCR를 이용한 유도전동기의 速度制御에 관한 연구

(靜止形周波數變換裝置의 試作)

논 문
19~4~1

Speed Control of the Induction Motor Using SCR

(Trial Manufacturing of Solid-state Frequency Converter)

원 종 수*
(Jong Swoo Won)

[ABSTRACT]

It is well known that solid-state devices like inverter and converter made by transistor and other semi-conductors are widely used for the purpose of motor speed control in industrial fields.

This paper is devoted primarily to a study of Trial Manufacturing of Solid-state Frequency Converter by means of single-phase bridge-type SCR inverter. The principle of the trial product belongs to AC-DC-AC conversion system.

The voltage to be impressed to the motor in case of speed control by frequency conversion method is necessary to be proportional to frequency. It also requires the frequency and voltage are independent to the load variation. In order to meet above requests required to motor speed control, the trial product introduced the open loop system in the frequency setting and closed loop system in the voltage setting.

The trial product showed the favorable performance characteristics in speed control of single-phase fractional horsepower motor from 45HZ through 80HZ.

1. 서 론

최근 半導體工業의 급속한 발달은 신뢰성이 높은 SCR를 염가로 입수 가능케 하였으며 電動機制御分野에서도 SCR를 이용한 交流電動機의 速度制御裝置는 靜止機器인 點, 高效率, 無騷音, 小形輕量, 長壽命 保守容易等의 諸特徵으로 인하여 우리나라에서도 급속히 개발될 것으로 본다.

그러므로 SCR를 이용한 周波數變換裝置를 개발함에 있어 AC→DC→AC變換인 逆變換器(以下 인버터라함)로할 때와 AC→AC直接變換인 사이크로 콘버어터로할 때의 主回路 및 制御回路의 構成도 負荷의 運轉條件에 따라 여러가지로 구성할 수 있을 것이다.

본 연구에서는 單相誘導電動機의 速度制御를 목적으로 Diode整流器, 直流中間回路, 强制轉流形 逆變換器로 主回路를 구성하고 閉루우프인 電壓制御回路와 開루우프인 周波數制御回路로 制御系統을 구성한 인버어터를 시작하고 負荷試驗을 실시한 결과 効率面과 $\frac{V}{f}$=一定으로 하는 制御面에서 비교적 양호한 결과를 얻은 바 있어 시작품에 대하여 主回路 및 制御系의 구성과 運轉結果를 보고하고 아울러 부수되었든 문제점을 제시코저 한다.

2. 周波數制御裝置에 요구되는 성능

交流電動機制御用 周波數變換裝置에 요구되는 성능으로는

(1) 광범위하고 연속적인 周波數變換이 가능할 것

(2) 주파수와 동시에 전압도 변경할 수 있을 것

(3) 전동기의 起動電流와 같은 過電流에 대하여 轉流失敗가 이러나지 않을 것

(4) 周波數安定度가 높을 것

(5) 負荷인 전동기와 협조가 이루어진 특성을 구비하고 있어 亂調 또는 脫調가 일어나지 않을 것

*정회원 : 서울공대 공업교육과 조교수

(6) 電源의 異常低下 또는 瞬時停電에 대하여 轉流失敗가 없을뿐 아니라 운전을 계속할 수 있을 것

등이 요구된다.

주파수는 요구되는 速度制御範圍에 의하여 결정되지만 전동기내의 磁束을 일정히 유지하려면 전압은 주파수에 비례함이 필요하다.

3. 主回路 및 制御系의 구성

AC→DC→AC 變換인 인버어터는 AC→DC變換過程에서 다이오드를 사용하였을 때 전력의 回生이 어렵고 轉流失敗時는 自己回復能力이 없다. AC→AC變換인 사이크로 콘버어터는 强制轉流回路를 갖이지 않기 때문에 일반적으로 電源周波數의 $\frac{1}{3}$이상인 주파수를 얻기에 곤난한 점이 있으며 게이트 信號回路의 복잡성, SCR을 흐르는 循還電流等이 문제된다.

시작품은 轉流失敗가 惹起되었을 때 自己回復能力은 없으나 광범위한 주파수制御를 목적으로 AC→DC→AC 變換인 間接式周波數變換方式을 사용하였으며 主回路 및 制御系統은 위에서 지적한 諸性能을 가급적 만족토록 그림 1과 같이 구성하였다.

主回路는 다이오드整流器, 電壓調整回路, 인버어터로 대별되며 電源, SCR, 電動機等의 各 定格電壓에 따라 交流電源側과 出力側에 변압기를 필요로하는 경우가 생길 것이다.

制御回路는 直流의 位相制御에 의한 閉루우프의 電壓制御回路와 인버어터 주파수를 調整하기 위한 開루우프周波數制御回路로 구성하였으며 一元化된 制御信號가 兩制御回路에 주어지도록 하였다.

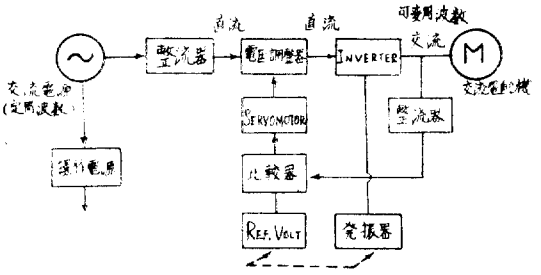

그림 1. 周波數變換器構成圖

Fig. 1. Block diagram of freguency changer.

3—1. 整流回路 및 電壓調整回路

電壓調整回路는 起動時의 直流定電壓制御, 定常運轉狀態의 交流出力電壓制御 및 電流制限制御의 3요소를 고려하여야 한다. 본 시작품에서는 주로 交流出力電壓制御만을 대상으로 하였으며 운전중 주파수에 相應한 出力電壓을 유지토록 동작하고 電壓檢出信號는 磁束에 대응토록 하였다. 電動機 起動電流에 대하여는 電流制限器를 필요로하나 본 연구에서는 그림 22와 같이 60Ω 可變抵抗을 사용하여 약 15Ω 부근에 고정하고 대용하였다.

整流는 다이오드(IN 1204) 4개를 사용한 부릿지式 整流回路를 사용하였으며 電壓制御는 SCR와 UJT를 사용하였다. (그림 2)

負荷로서 抵抗을 사용한 경우 각부분에 있어서 전압 또는 電流波形은 그림 3과 같이 되며 出力側의 평균직류전압치는 電源電壓과 게이팅 펄스와의 位相角이 θ일 때

$$V_{DC}=\frac{1+\cos\theta}{\pi}V_m \quad [V]$$

이 된다. 즉 出力電壓의 調整은 θ를

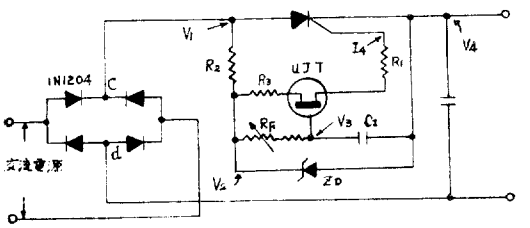

그림 2—1. 整流및電壓調整回路

Fig. 2—1. Rectifier and voltage regulator circuit.

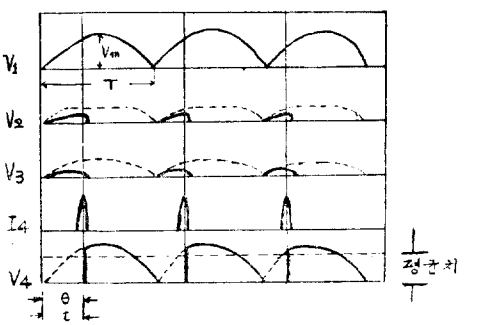

그림 2—2. 電壓波形

Fig. 2—2. Voltage wave form.

그림 2. 整流器 및 電壓調整回路와 各部分에서의 電壓波形

Fig. 2. Rectifier, voltage regulator circuit and voltage wave form in regulator circuit.

변화하면 되는데 여기서는 R_4를 調整하여 C_1의 充電時間特性을 변화시켜 θ를 調整하였다. 充電週期 t는

$t=R_F C_1 \log\frac{1}{1-\eta}$ 〔sec〕

$\theta=\frac{\pi}{T}t$ 〔rad〕

$\eta\left(=\frac{V_P}{V_2}\right)$ 스탠드 오프比, (Standoff ratio)

T 電源의 半週期$=\frac{1}{120}$ 〔sec〕

V_P 에밋터電壓의 피이크値

로 된다. 본실험에서는 UJT 2N1671 ($\eta=0.62$)를 사용하였으며 V_2는 1N1527 제어너 다이오드를 사용하여 22〔V〕가 되도록 하였다.

可變抵抗 R_F는 100〔KΩ〕의 Helipot를 사용하였으며 이 可變軸은 앞에서 설명한 바와 같이 인버어터의 출력전압이 주파수에 비례하여 변화하도록 서어보 전동기를 사용하여 회전케 하였다. 또한 인버어터의 入力으로 완전한 直流를 공급할 목적으로 필터 콘덴서로는 1500〔μF〕의 電解 콘덴서를 사용하였다.

整流 및 電壓調整過程에서의 電壓波形을 관측한 결과는 그림 3, 4, 및 5와 같다.

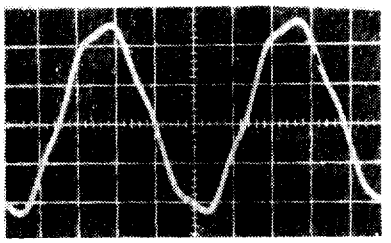

그림 3. 60〔C/S〕 電源電壓波形(電流 0일 때)
Fig. 3. Wave form of source voltage at 60 cycles when current is zero.

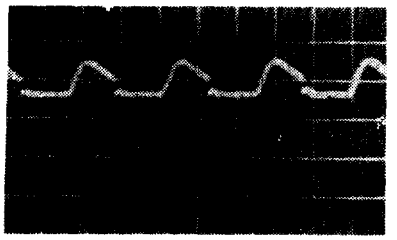

그림 4. 全波整流波形(그림 2의 cd點에서)
Fig. 4. Voltage wave form of full voltage rectification at c and d points.

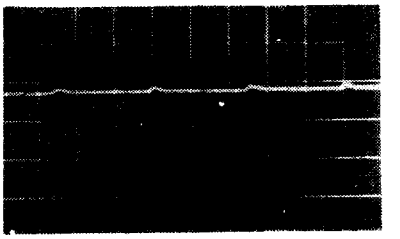

그림 5. 直流出力電壓波形(交流電源 60〔C/S〕, 100〔V〕 無負荷狀態)
Fig. 5. Wave form of DC output voltage(60〔C/S〕, 100〔V〕, No load state)

3—2. 팔루스 發振器(인버어터 点弧回路)

부릿지形 인버어터를 点弧하기 爲하여 2個의 出力端에서 교대로 트리거 신호를 발생하는 發振器를 사용하였으며 그림 6과 같이 2個의 UJT를 사용하였다. 양측의 發振器를 同期化하기 위하여 그 사이는 콘덴서 C_3로 접속하였다.

2個의 UJT중 하나가 点弧하면 C_3와 C_1 또는 C_3와 C_2로 구성되는 容量分壓器에 依하여 負電壓 스탭이 한 쪽 UJT의 에밋터에 가해진다. 이 負電壓이 에밋터 전압의 낮은 시점에서 발생하였을 때는 UJT의 點弧 늦임은 에밋터 전압이 높은 시점에서 발생하였을 때에 비하여 그 늦는 角은 콘덴서의 非直線充電特性으로 인하여 작아진다. 이와 같이하여 同期가 유지되며 2個의 出力端 A″, B″에서 발생하는 팔루스와 振動周波數사이의 相對的 間隔은 2個의 포탠쇼미이터 R_3, R_4로 調整한다. 본 시작품에서는 30~80사이를 범위에서 정확히 動作하였었다. A″點에서의 팔루스 波形은 그림 7, 8과 같으며 R_4는 比較器와 連動으로하여 주파수가 변화할 때 發振周波數도 자동적으로 調整되도록 구성하였다. 인버어터 点弧

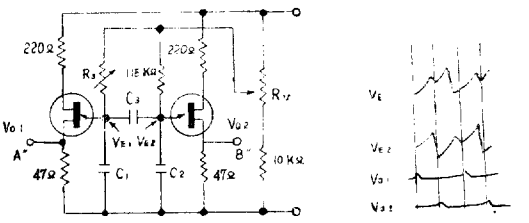

그림 6. 팔루스發振器回路 및 팔루스波形
Fig. 6. Pulse generator circuit and pulse wave form.

에 충분한 팔루스 勢力을 얻기 위하여 發振器의 팔루스를 增幅하여 인버어터의 게이트에 가하였다.

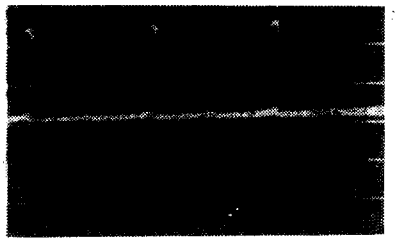

그림 7. 팔루스波形(60[C/S]팔루스)
Fig. 7. Wave form of 60 cycle pulse at A″-terminal.

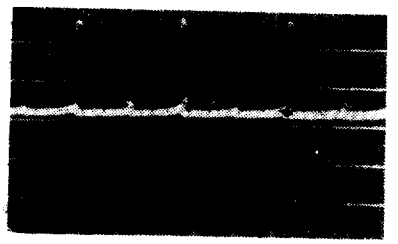

그림 8. 팔루스波形(70[C/S]팔루스)
Fig. 8. Wave form of 70 cycle pulse at A″-terminal.

3—3. 比較器

周波數變換法에 의하여 교류전동기의 속도를 制御하려면 $\frac{V}{f}$=一定으로 制御되여야 한다. 전압과 주파수는 別箇의 制御回路에 의하여 制御하여야 하므로 2個의 設定信號를 필요로 한다. 兩信號를 얻는 방법으로 2個의 可變抵抗을 連動케하여 그중 하나를 포텐쇼미이터로 하여 電壓設定器로 하고 하나는 抵抗値를 可變하여 周波數變換器로 하는 방법이 있다. 본연구에서 사용한 比較器回路는 그림 9와 같다.

比較器는 그림 9와 같이 2개의 트랜지스터(PNP 1個, NPN 1個와 高感度繼電器를 使用한 ON→OFF→ON 制御系統으로 구성하였다.

誤差信號 ε는

$$\varepsilon = E_1 - E_2 \qquad [V]$$

로 設定하였으며 E_1으로는 팔루스 發振器의 팔루스周波數에 비례하는 직류전압을, 또한 E_2로는 인버어터의 출력을 整流하여 인버어터의 출력전압에 비례하는 전압을 取出하여 이용하였다. 그림 10에서와 같이 $E_1-E_2>0$가 되어 Dead Region을 넘으면 Forward 繼電器 F가 勵磁되어 서어보 전동기가 회전하고 따라서 電壓調整回路의 R_F가 調整되어 출력직류전압을 증가시킨다. $E_1-E_2<0$가 되면 그 반대가 된다.

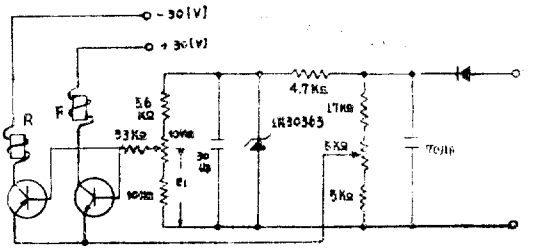

그림 9. 比較器回路
Fig. 9. Comparator circuit..

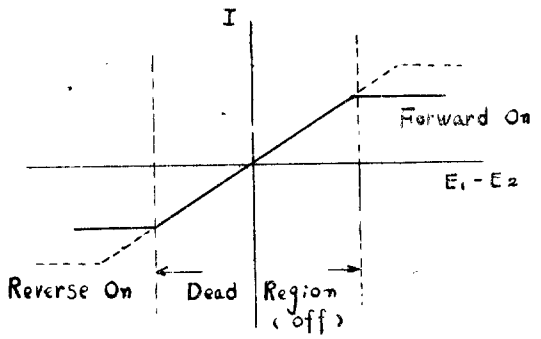

그림 10. 電壓과 電流와의 關係
Fig. 10. Relation between comparison voltage and current.

본 실험에 사용한 繼電器는 動作電流 2.3 [mA], 內部抵抗 8,000 [Ω]의 것이며 全比較裝置의 電壓感度는 ±3[V]이다.

본방법에 의하면 주파수가 抵抗値의 溫度變化로 인하여 오차를 일으킬 것이 예상되었으나 실험중 이러한 현상은 없었다. 이에 대한 보상은 恒溫槽等을 사용하면 해결될 것으로 본다.

速度制御範圍가 넓은 裝置의 설계시는 低周波에서 低電壓이 되므로 電動機捲線 임피이던스 때문에 충분한 톨크 발생에 필요한 전류가 흐르기 어려울 것으로 본다. 따라서 低周波領域의 전압을 일정히 할 수 있는 非線形關數發生器를 도입하여야 할 것으로 본다.

3—4. 인버어터

인버터로서는 그림 11과 같은 푸시부릿지形 인버어터를 사용하였다. 인버어터의 入力電源으로는 가급적 脈動이 적은 平滑한 직류가 적합하다. 따라서 인덕턴스 L가 큰 임피이던스를 연결하여야 한다. 본실험에서는 抵抗 R로 대용하였다. 또한 R는 SCR誤動作으로 인하여 惹起될 수 있는 短絡電流를 制御하여 SCR의 보호도 겸하게 하였다.

端子 B에서 A를 향하여 직류전압 E를 印加하고 周波數制御裝置에 의하여 角周波數 w에 해당하는 制御電壓을 SCR 게이트에 印加하여 SCR ①, ②에 실선 ↓ 방향으로 전류를 흘리면 負荷 및 轉流콘덴서의 枝路에 實線 ↑방향으로 전류가 흐른다. 콘덴서 C가 충분히 충전되었을 때 주파수 制御裝置에 의하여 SCR ③ ④를 通電하면 SCR ① ②로부터 點線 ↓방향으로 전류가 各枝路에 흐른다. 이와 같은 과정을 반복하여 負荷 및 콘덴서 枝路에 矩形波 교류가 발생한다.

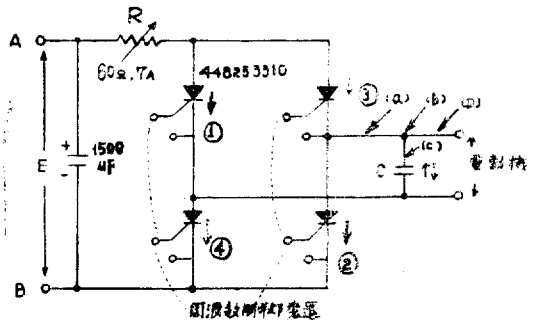

그림 11. 인버어터回路
Fig. 11. Inverter circuit.

그림 11과 같은 矩形波에서 角周波數를 ω_1이라 하고 이를 Fourier 級數로 展開하면

$$v(t)=\frac{4V}{\pi}\sum_{k=1,3,5\cdots}^{\infty}\frac{1}{k}\sin k w_1 t$$

實效値 V_{eff}는

$$V_{eff}=\sqrt{\frac{1}{2\pi}\int_0^{2\pi}\left[\frac{4V}{\pi}\sum_{k=1,3,5\cdots}^{\infty}\frac{1}{k}\sin k w_1 t\right]^2 d(w_1 t)}$$

$$=\frac{4V}{\sqrt{2}\,\pi}\sqrt{\sum_{k=1,3,5\cdots}^{\infty}\left(\frac{1}{k}\right)^2}$$

이 되고 瞬時値는 奇數高調波를 포함하는 正弦波로 된다.

인버어터의 出力電壓, 電流, 轉流콘덴서에 흐르는 電流 및 電壓波形을 관측한 결과는 그림 13~16과 같다.

그림 13. 인버어터의 出力電流波形(60사이클, 100V, 電動機無負荷運轉, 그림 11의 a—點)
Fig. 13. Output current wave form of inverter at a-point of Fig. 11. (60[C/S], 100[V])

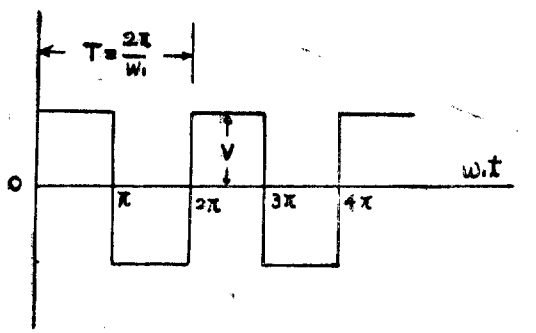

그림 12. 인버어터의 出力電壓波形
Fig. 12. Output voltage wave form of inverter.

그림 14—1. [50C/S]

그림 14—2. [60C/S].

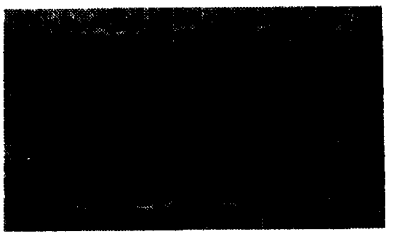

그림 14—3. [70C/S].

그림 14. 周波數變更時의 轉流콘덴서의 端子電壓波形 (그림 11의 b點에서 測定)

Fig. 14. Terminal voltage wave form of commutation condenser at various frequency observed at point-b in Fig. 11.

그림 15. 轉流콘덴서의 電流波形(그림 11의 C點)

Fig. 15. Current wave form of commutation condenser at point-C in Fig. 11.

그림 16—1. 50[C/S].

그림 16—2. 60[C/S].

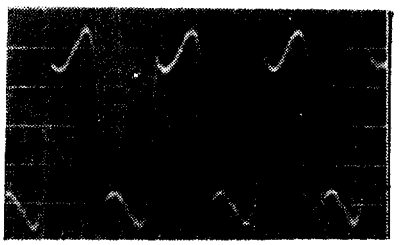

그림 16—3. 70[C/S].

그림 16. 周波數變更時의 電動機入力電流波形 (그림 11의 D點)

Fig. 16. Motor input current wave form at 50, 60, and 70 cycles observed at point-D in Fig. 11.

그림 17~21은 상기 각부품의 실물사진이며 그림 22는 본연구로 설계제작한 周波數變換裝置의 結線圖이다.

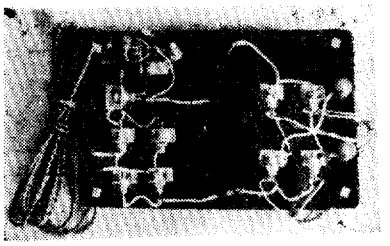

그림 17. 整流器 및 인버어터裝置
Fig. 17. Rectifier and inverter.

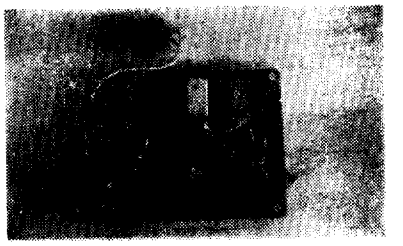

그림 20. 比較器 및 서어보電動機 操作裝置
Fig. 20. Comparator and servo motor controlling device.

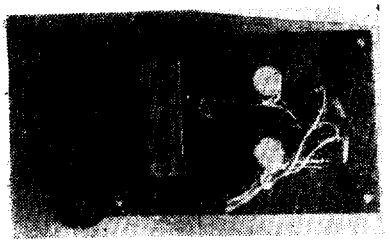

그림 18. 操作電源裝置
Fig. 18. Controlling source apparatus.

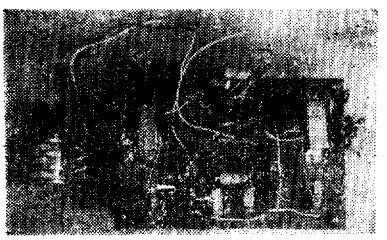

그림 19. 펄스發振器
Fig. 19. Pulse generator.

그림 21. 서어보電動機 및 電壓調整抵抗器
Fig. 21. Servo motor and voltage adjusting resistor.

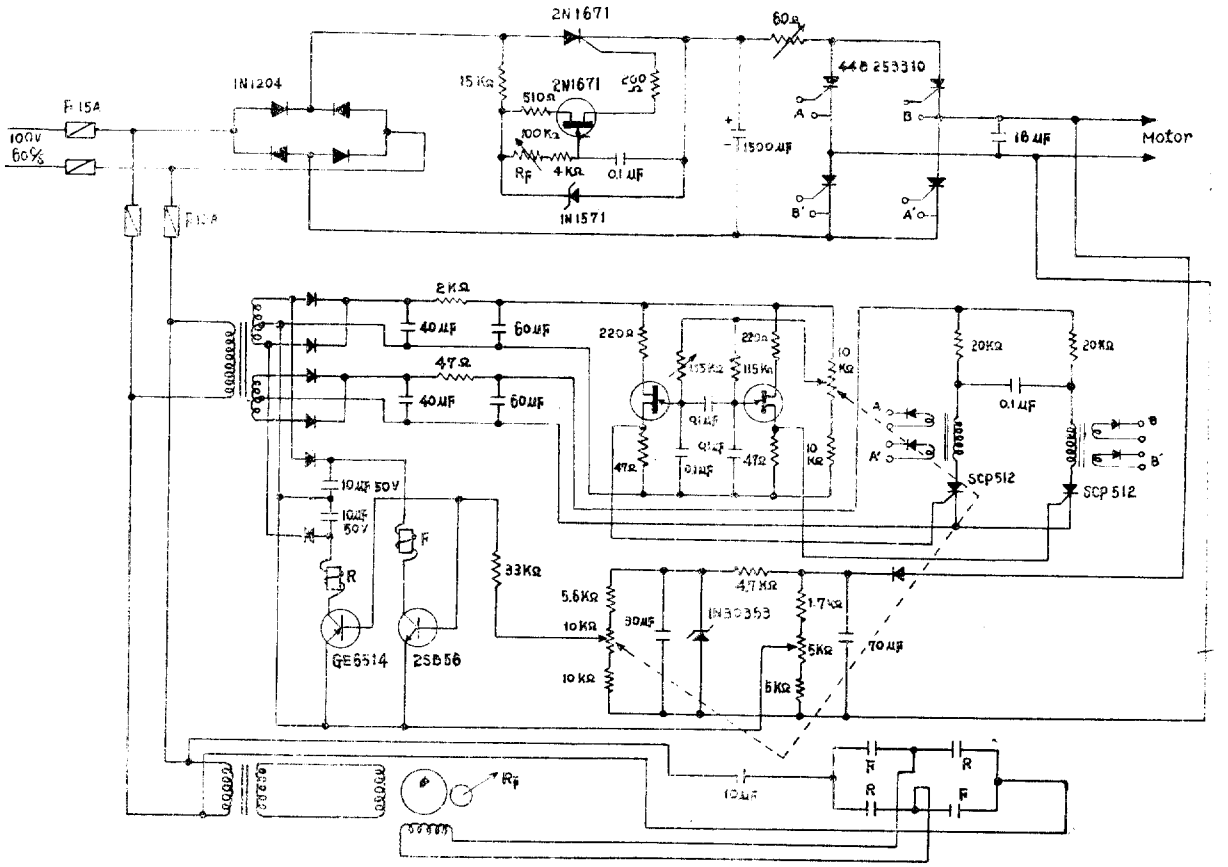

그림 22. 試作周波數變換裝置結線圖

Fig. 22. Connection diagram of frequency converter made as a trial product.

4. 負荷實驗

試作 周波數變換器의 周波數制御範圍는 30～80〔C/S〕 정도이고 電流容量은 7〔A〕이다.

4—1. 抵抗負荷

試作한 周波數變換器에 抵抗負荷를 걸고 50, 60, 70〔C/S〕에서 실험한 결과는 그림 23과 같었다.

실험결과 인버어터의 출력전압은 無負荷時나 負荷時 대체로 일정하였으며 주파수가 낮은 측에서 효율이 좋았었다. 손실의 대부분은 SCR의 轉流損 및 制御回路에서의 손실로 볼 수 있으며 60〔C/S〕에서 효율은 약 78%이였다.

4—2. 誘導電動機의 可變速運轉

周波數變換裝置의 動作周波數는 게이트를 驅動하는 發振器 周波數에 의하여 정하여지게 하고 SCR의 轉流는 인버어터의 轉流콘덴서에 의하여 행하여지도록한 결과 전동기의 可變速運轉中 주파수의 變動은 없었다.

供試電動機로는 신일전기, $\frac{1}{20}$〔HP〕, 100〔V〕, 換氣用 콘덴서 전동기를 사용하였다. 45～75〔C/S〕 범위에서 矩形波電源으로 可變速運轉을 하였을 때 전동기특성은 다음과 같다.

(1) 正弦波電壓 印加時와 矩形波電壓 印加時의 전동기특성(그림 24)

① 出力 對 速度特性은 矩形波電壓 印加時가 출력이

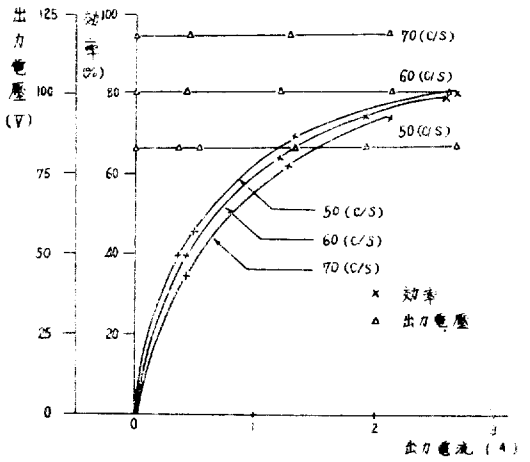

그림 23. 周波數變換器負荷特性曲線
Fig. 23. Load characteristic curves of frequency converter.

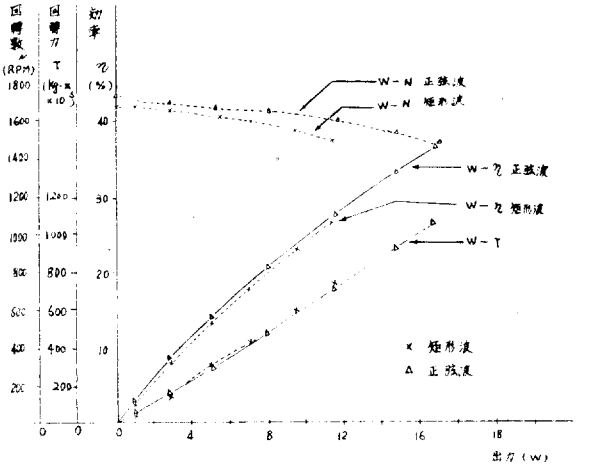

그림 24. 矩形波電源 印加時와 正弦波電源 印加時의 電動機의 特性曲線(100[V], 60[C/S])
Fig. 24. Comparison of motor characteristics at sine wave voltage and rectangular voltage. (100[V], 60[C/S])

증가함에 따라 正弦波電壓을 印加할 때보다 속도는 약간 저하하였다.

② 回轉力은 正弦波電壓 印加할 때에 비하여 矩形波電壓을 印加할 때가 약간 상승하지만 그 차이는 극히 微小하였다.

③ 矩形波電壓으로 전동기를 운전할 때 효율은 正弦波電壓으로 운전할 때보다 약간 低下하였으며 이는 인버터의 출력이 矩形波인 관계로 상당한 高調波分을 포함하기 때문이다.

(2) 可變周波數, 矩形波電源에서의 運轉特性(그림25)

① 주파수 대 전압, 전류, 속도, 출력, 입력 및 효율 특성실험은 $\frac{V}{f}$=一定을 유지한 상태에서 실시하였으며

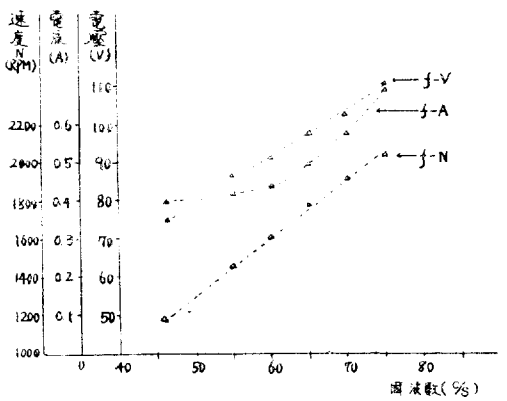

그림 25—1

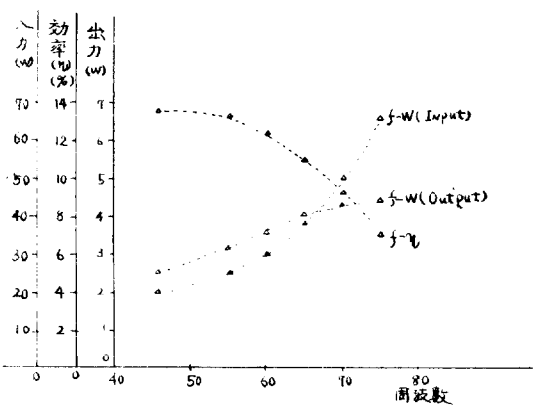

그림 25—2

그림 25. 電動機의 運轉特性曲線(矩形波電壓, 周波數可變, 一定回轉力(=214.2×10⁻⁵[kg-m])負荷
Fig. 25. Running characteristics of motor under the various frequency, rectangular voltage, constant torque load 214.2×10⁻⁵[kg-m].

출력전압은 자동적으로 주파수에 따라 制御되었다.

② 一定回轉力下에서 실험한 결과 전류 및 출력은 각각 주파수 증가에 따라 증가하였으며 속도는 직선적으로 변화하였다.

③ 효율은 一定回轉力負荷를 거른 관계로 주파수가 증가함에 따라 감소하였다.

5. 결　　론

본문은 유도전동기의 速度制御用으로 試作한 單相 부릿지形 SCR 周波數變換器의 主回路 및 制御系統의 구성에 대하여 定性的인 면에서 주로 고찰하였다. 본시작품의 특징은 다음과 같다.

(1) 位相制御에 의한 閉루우프의 電壓制御回路와 開루우프 周波數制御回路回路를 組合하여 주파수에 비례하는 電壓制御를 용이하게 할 수 있었다.

(2) 45~75 [C/S] 범위에서 연속적인 周波數制御가 가능하였으며 인버어터를 通한 短形波電源으로 전동기를 驅動하고 正弦波電壓 運轉時와 비교하였을 때 그 차이는 극히 僅少함을 알았다.

(3) 轉流失敗時에 惹起되는 短絡電流에 對한 보호, 過電壓保護, 서어보전동기 대신 制御應答이 빠른 전자장치의 도입, 高調波分 除去등에 대하여는 앞으로 개발에 있어 고려되어야할 점으로 본다.

끝으로 本 硏究는 1969年度 서울大學校 學術硏究費에 依한 것으로 이 點 當局에 感謝드리는 바이며 本 硏究進行에 많은 協助를 한 本 大學韓松曄 專任講師에게 謝意를 表한다.

부　　록

1. 試作周波數變換裝置의 특성시험(抵抗負荷)

周波數 [C/S]	電源電壓 [V]	入力電流 [A]	入　力 [W]	出力電壓 [V]	出力電流 [A]	出　力 [W]	效　率 [%]
50	120	0.4	35	83.4	0	0	0
50	120	0.8	75	83.4	0.36	30	40.0
50	120	1.0	94	83.4	0.50	42	44.7
50	120	1.6	158	83.4	1.32	110	69.6
50	120	2.3	223	83.4	1.98	165	74.0
50	120	3.0	280	83.4	2.68	224	80.0
60	120	0.5	55	100	0	0	0
60	120	0.9	102	100	0.4	40	39.2
60	120	1.7	185	100	1.18	118	63.8
60	120	2.6	285	100	2.16	216	75.9
60	120	3.1	331	100	2.60	260	78.5
70	120	0.6	83	116.5	0	0	0
70	120	1.1	144	116.5	0.43	50	34.7
70	120	1.9	240	116.5	1.27	148	61.6
70	120	2.7	340	116.5	2.12	247	72.5

2. 試作周波數變換裝置에 의한 유도전동기의 速度制御試驗

電　壓 (V)	電　流 (A)	入　力 (W)	周波數 (cycle)	回轉速度 (RPM)	回轉力 (kg-m)	出　力 (W)	同期速度 (RPM)	스　립 %	效　率 %
75	0.4	19	46.5	1,160	214.2×10^{-5}	2.547	1,395	16.85	13.42
86	0.42	24	55	1,445	214.2×10^{-5}	3.18	1,650	12.43	13.25
91	0.43	29	60	1,618	214.2×10^{-5}	3.56	1,800	10.1	12.3
97.5	0.495	38	65	1,780	214.2×10^{-5}	4.1	1,950	8.74	10.8
102	0.57	49	70	1,904	214.2×10^{-5}	4.2	2,100	4.75	8.57
110	0.695	65	75	2,020	214.2×10^{-5}	4.45	2,250	10.22	6.85

備考：一定回轉力負荷로 實驗함.

3. 100[V], 60[C/S] 正弦波電源에 의한 전동기 특성시험

電壓 (V)	電流 (A)	入力 (W)	周波數 (Cycle)	回轉速度 (RPM)	運轉回轉力 (kg-m)	出力 (W)	效率 (%)
100	0.42	32	60.7	1,720	0	0	0
100	0.435	33	60.7	1,695	160×10^{-5}	2.783	8.45
100	0.45	36	60.7	1,675	288×10^{-5}	4.97	13.8
100	0.47	38	60.7	1,650	464×10^{-5}	7.85	20.61
100	0.505	42	60.7	1,585	704×10^{-5}	11.43	27.2
100	0.524	44	60.7	1,535	928×10^{-5}	14.63	33.3
100	0.55	45	60.7	1,477	1807×10^{-5}	16.48	36.6

4. 100[V], 60[C/S] 矩形波電源에 의한 전동기 특성시험

電壓 (V)	電流 (A)	入力 (W)	周波數 (Cycles)	回轉速度 (RPM)	運轉回轉力 (kg-m)	出力 (W)	스립 (%)	效率 (%)
100	0.45	33	60	1,672	0	0	7.12	0
100	0.455	34	60	1,663	54.4×10^{-5}	0.93	7.66	2.74
100	0.485	35	60	1,644	166.4×10^{-5}	2.807	8.66	8.04
100	0.495	36	60	1,610	320×10^{-5}	5.29	10.55	14.7
100	0.51	38	60	1,590	422×10^{-5}	6.89	11.66	18.15
100	0.525	40	60	1,538	598×10^{-5}	9.44	14.56	23.6
100	0.545	42	60	1,484	736×10^{-5}	11.22	18.44	26.62

參 考 文 獻

(1) 朴旻鎬：可變周波數에 있어서 유도전동기특성의 圖式算定法에 관한 연구 研究報告 서울工大 第3卷第1號 1968. 9월, p. 81~121

(2) 朴旻鎬：電動機應用(電氣制御編) 東明社.

(3) 小津, SCR기초와 응용. 오옴社

(4) 茂木, 인버어터·콘버어터. 日刊工業新聞社

(5) 築地, 相川 SCR과 其應用. 日刊工業新聞社

(6) 竹內, SCR回路理論과 電動機制御에의 應用. 오옴社.

(7) Jacob Millman and Christos C. Halkias. Electronic Devices and Circuits. Mcgraw-Hill.

(8) Robert Murray, JR. Sillicon Controlled Rectifier Designers Handbook.