

# 單相 INVERTER를 使用한 單相 / 3相 相變換機構와 그 特性에 관한 研究

論文  
27~3~4

## Characteristic Study on Single to Three Phase Conversion Using Single Phase Inverter

李承院\* 南副熙\*\*  
(Sung Won Rhee, Boo Hee Nam)

### Abstract

This paper deals with the phase converter.

The single-phase inverter with  $120^\circ$  phase-lagging is used for the phase conversion.

As the waveform of the inverter is rectangular, the output waveforms of the three-phase lines include the harmonics.

Single-phase operation by using phase converter and three-phase balanced operation of the three-phase induction motor are compared, and the effects of the harmonics are analyzed and discussed.

었다.

그런데 mono-cycle방식은 capacitor와 reactor의 가변이 복잡하고, converter-motor의 경우는 너무 고가이며, autotransformer-capacitor를 이용하는 방법은 부하상태에 따라 단자전압이 심한 불평형을 일으키므로 이의 검출과 또 용량가변을 해야하는 불편이 있다.

근래에 와서 thyristor의 개발과 더불어 변환장치로 3상 AC inverter가 이용되고 있지만 더욱 간략한 방법으로 상변환을 이루하기 위하여 단상 inverter전압과 단상전압으로 상변환 장치를 고안하였다.

그리고 이 경우 전압의 불평형과 고조파 함유가 예상되므로 이를 해석하고 또 실제 실험에 의한 결과와 비교함으로써 본 변환방법에 의한 전동기 운전에 지장이 없음을 증명하였다.

### 2. 相變換의 原理와 實驗裝置의 出力特性

그림 1은 본 실험의 기본 원리도이고 그림 2는 그 main circuit이다. 그림 2에서 AB는 단상공급전원단자이고 OC는 공급 전원보다  $120^\circ$  phase lagging하는 inverter의 출력단자로 단자 A,B,C로 부터 3상전원  $V_{AB}$ ,  $V_{BC}$ ,  $V_{CA}$ 를 얻게 된다.

本研究에서는  $V_{OC}$ 의 전압을 단상 inverter로 만들어 주는데, inverter 출력파형의 최악의 경우인 구형파를 사용하였다. 즉  $V_{AB}$  파형은 기본 파이고,  $V_{BC}(=$

### 1. 서 론

최근 농어촌을 전화함에 있어서 수용가가 넓은 지역에 산재해 있기 때문에 필연적으로 저압배선로가 걸어지고 있다. 또한 농어촌의 경우 동력부하는 그렇게 크지 않을뿐 아니라 그 운전도 간헐적이다.

그런데 같은 용량에 있어서 단상전동기는 3상전동기보다 기동전류가 크기 때문에<sup>(1)</sup> 배선전로가 걸 경우 기동이 안될때가 많고, 기동이 되더라도 기동시 타 수용가에 미치는 영향이 크다. 또한 운전시에 효율이 나쁘며 그 제작비도 비싸다.

이상과 같은 점으로 보아 농어촌에서도 가능한한 동력부하전동기로서 3상 전동기를 사용하는 것이 유리하며, 비교적 대용량 전동기를 사용할 수 있을 것이므로 본 연구에서는 단상을 3상으로 변환하는 새로운 방법을 고안하고, 이에 의하여 전동기를 구동시켰을 경우의 특성을 해석하였다.

상변환 방법으로서는 3상유도전동기의 단자에 capacitor와 reactor를 접속하여 운전하는 mono-cycle방식<sup>(2)</sup>과, Converter-motor를 사용하는 방법<sup>(3)</sup>, 그리고 autotransformer-capacitor를 이용하는 방법<sup>(4)</sup>등이 있

\* 正會員: 서울大工大教授·工博(當學會會長)

\*\*正會員: 忠南大工大助教授

授接日字: 1978年 5月 1日

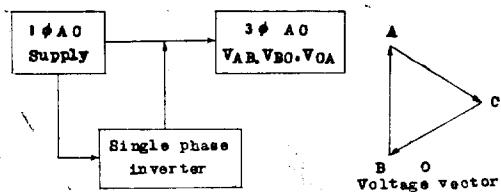


그림 1. 단상/삼상 변환기본도

Fig. 1. 1φ/3φ conversion block diagram

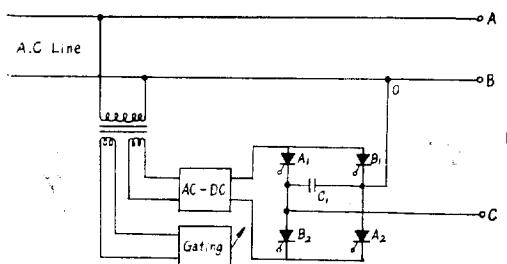


그림 2. 단상/삼상 주회로도

Fig. 2. 1φ/3φ main cct diagram

$V_{oc}$ )는 구형파,  $V_{CA}$ 는 기본파와 구형파의 합성파형이 된다.

전압  $V_{AB}$ 를 제외한 두 파형은 高調波를 포함한 파형이지만 inverter의 PWM(pulse-width modulation)의 개발<sup>(6)(7)(8)</sup>로 구형파의 고조파 포함문제는 별로 문제되지 않으며, 3相 inverter의 파형이 모두 구형파(또는 고조파를 포함한 交流)인 점을 감안하면, 本 실험파형은 훨씬 양호하다 할 수 있고, 전압파형이 약간 일그러졌다해도 전동기의 主 impedance인 inductance에 의해 실제의 電流波形은 보다 개선되어 정현파에 가깝다.

## 2-1. 單相 inverter의 動作과 周波數 同期

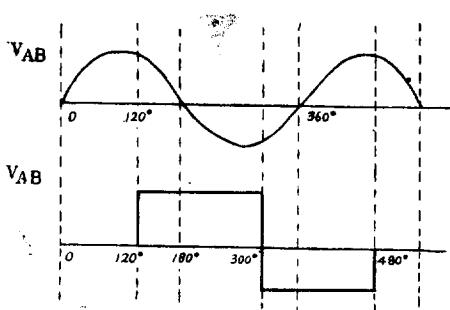


그림 3. 전원전압과 inverter의 출력전압위상비교도  
Fig. 3. phase comparison between source and inverter-output voltage

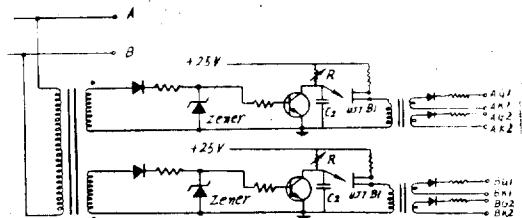
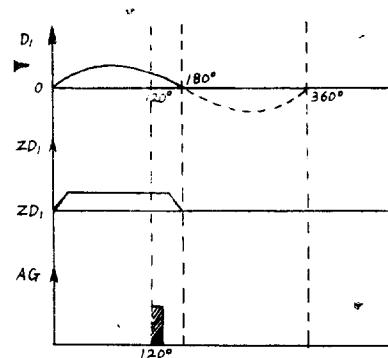


그림 4. 120° 상지연-케이트회로도

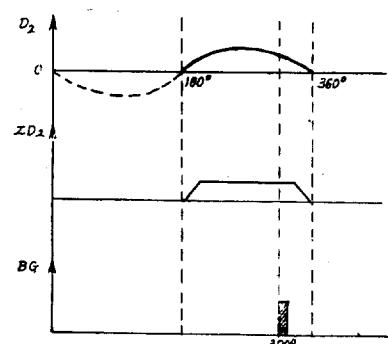
Fig. 4. 120° phase lagging gate cct diagram

그림 2의 inverter 出力電壓이 단상 AC 전원보다 120° phase lagging시키기 위해 즉 그림 3과 같은 形을 얻기 위해, 그리고 전원주파수와 inverter의 出力 주파수를 同期시키기 위해 그림 4와 같은 gating circuit를 사용하였다.

gating sequence를 그림 4에 따라 설명하면 그림 5와 같다.



(a) Mode 1



(b) Mode 2

그림 5. 120° 상지연-케이트파형 (a) (b)

Fig. 5. 120° phase lagging gate waveforms (a)  
(b)

그림 4의 가변저항 R에 의해 gating pulse가 半波整流의  $\frac{2}{3}$  되는 점( $120^\circ$ ,  $300^\circ$ )에서 발생하도록 하였다.

gating port  $AG_1-AK_1$ ,  $AG_2-AK_2$ 는 Mode 1에 따라 SCR  $A_1$ ,  $A_2$ 를 gating하여, gating port  $BG_1-BK_1$ ,  $BG_2-BK_2$ 는 Mode 2에 따라 SCR  $B_1$ ,  $B_2$ 를 gating한다.

Mode 1에 의해 SCR  $A_1$ ,  $A_2$ 가 ON되고, SCR  $B_1$ ,  $B_2$ 는 OFF상태일 때, Commutation capacitor  $C_1$ 은  $A_1 \rightarrow C_1 \rightarrow A_2$ 方向으로 充電되고, Mode 2에 의해 SCR  $B_1$ ,  $B_2$ 에 gating이 되면 먼저  $B_1 \rightarrow C_1 \rightarrow A_1$ 閉회로,  $B_2 \rightarrow A_2 \rightarrow C_1$ 閉회로를 구성하여  $C_1$ 의 充電荷가 放電하면서 SCR  $A_1$ ,  $A_2$ 의 全電流를 holding current 以下로 저하시켜 SCR  $A_1$ ,  $A_2$ 를 OFF시킴과 뛰어어 동시에 SCR  $B_1$ ,  $B_2$ 를 ON시킨다.

따라서  $C_1$ 의 兩端電壓은 Mode 1, Mode 2에 따라 구형파 AC전압이 된다.

## 2-2. 3相 出力 電壓・特性

순시차 전압파형을 Fourier Series로 나타내면 다음과 같다.

$$V_{AB}(t) = \sqrt{2} V \sin wt, w=120\pi$$

$$V_{BC}(t) = -\frac{4}{\pi} V \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n} \sin \frac{n\pi}{2} \left( \cos \frac{n\pi}{6} \cos nw t + \sin \frac{n\pi}{6} \sin nw t \right)$$

$$\approx 1.273 V \sin \left( wt + \frac{4}{3}\pi \right)$$

$$+ 0.424 V \sin 3wt$$

$$+ 0.254 V \sin \left( 5wt + \frac{2}{3}\pi \right)$$

$$+ 0.181 V \sin \left( 7wt + \frac{4}{3}\pi \right)$$

$$+ 0.1415 \sin(9wt + \pi)$$

$$V_{CA}(t) = -(V_{AB} + V_{BC}) = -\sqrt{2} V \sin wt$$

$$+ \frac{4}{\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n} \sin \frac{n\pi}{2} \left( \cos \frac{n\pi}{6} \cos nw t + \sin \frac{n\pi}{6} \sin nw t \right)$$

$$\approx 1.349 V \sin \left( wt + \frac{2}{3}\pi \right)$$

$$+ 0.4244 V \sin(3wt + \pi)$$

$$+ 0.2546 V \sin \left( 5wt - \frac{\pi}{3} \right)$$

$$+ 0.1819 V \sin \left( 7wt + \frac{\pi}{3} \right)$$

$$+ 0.1415 V \sin 9wt$$

$V_{AB}$ 의 실효치는  $V=200[V]$ 이고,  $V_{BC}$ 의 실효치는

$$V_{BC} = \sqrt{\frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} V_{BC}^2 d\theta} = V_0$$

$$\begin{aligned} V_{CA} &= \sqrt{\frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} V_{CA}^2 d\theta} \\ &= \sqrt{\frac{1}{2\pi} \int_{\frac{\pi}{3}}^{\frac{2\pi}{3}} (\sqrt{2} V \sin \theta - V)^2 dB + \int_{\frac{2\pi}{3}}^{\frac{5\pi}{3}} (\sqrt{2} V \sin \theta - V)^2 d\theta} \\ &= \sqrt{2 - \frac{2\sqrt{2}}{\pi} V} = 1.0486 V \\ &= 209[V] \end{aligned}$$

따라서  $V_{AB}$ ,  $V_{BC}$ ,  $V_{CA}$ 는 線形파로 평형이라 볼 수 있다.

$V_{AB}$ 는 正弦波이고,  $V_{BC}$ ,  $V_{CA}$ 는 高調波를 포함한 正弦波로 기본파에 대한 고조파의 비율은 표 1과 같다

표 1. 기본파에 대한 고조파의 성분비

Table. 1. Harmonics-Rates Vs Fundamental

기본파	제 3 고조파	제 5 고조파	제 7 고조파	제 9 고조파
$V_{BC}$ 100(기준)	33	20	14	11
$V_{CA}$ 100(기준)	31	18	13	10

線間 電壓  $V_{AB}$ ,  $V_{BC}$ ,  $V_{CA}$  중  $V_{AB}$ 는 正弦波이고,  $V_{BC}$ ,  $V_{CA}$ 는 高調波를 포함하고 있지만 이를 해석의 편리상 상전압으로 나누면 표 2와 같이 각 상에 高調波를 포함한다.

표 2. 상전압의 고조파성분

Table. 2. Harmonics-Components of phase voltages

상전압 [V] 차수	$V_A$	$V_B$	$V_C$
1	115.661 $\angle -26.7^\circ$	104.002 $\angle -152^\circ$	110.188 $\angle 88.4^\circ$
3	19.988 $\angle 0^\circ$	19.970 $\angle 0^\circ$	40.012 $\angle 180^\circ$
5	11.974 $\angle 120^\circ$	11.946 $\angle 120^\circ$	24 $\angle -60^\circ$
7	8.532 $\angle -120^\circ$	8.488 $\angle -120^\circ$	17.15 $\angle 60^\circ$
9	6.67 $\angle 180^\circ$	6.67 $\angle 180^\circ$	13.34 $\angle 0^\circ$

그림 6은 3相 전압파형의 계산치와 실측치를 비교하여 그린 것이다.

위의 불평형 전압을 특히 부하로서 3相 유도전동기에 인가할 경우, 정상분 전압과 역상분 전압은 각각 정상파와 역상의 torque를 발생한다.

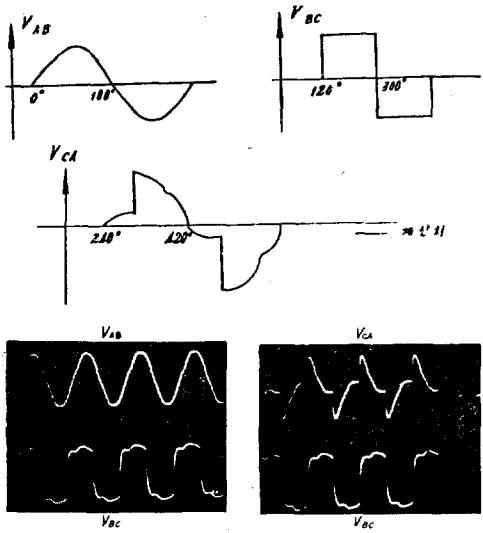


그림 6. 3相 出力 電壓波形

Fig. 6. Three phase-output voltage waveforms

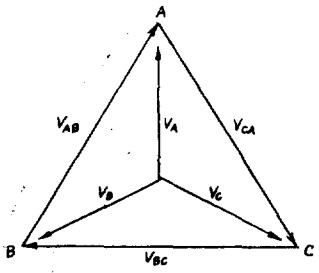


그림 7. 전압 벡터도

Fig. 7. Voltage vector diagram

그림 7에서

$$V_A = \frac{1}{3} V_{BC} + \frac{2}{3} V_{AB}$$

$$V_B = \frac{1}{3} V_{CA} + \frac{2}{3} V_{BC}$$

$$V_C = \frac{1}{3} V_{AB} + \frac{2}{3} V_{CA}$$

$$\text{여기에서 정상분 전압 } V_p = \frac{V_A + V_{B\alpha_2} + V_{C\alpha_2}}{3}$$

$$\text{역상분 전압 } V_n = \frac{V_A + V_{B\alpha_2} + V_{C\alpha_2}}{3}$$

$$a = \frac{-1 + i\sqrt{3}}{2}$$

각 고조파에 대한 정상분 전압과 역상분 전압은 표 3과 같다.

## 표 3. 정상분 전압과 역상분 전압

Table. 3. Positive and Negative Voltages

고조파 차수	$K=1$	$K=3$	$K=5$	$K=7$	$K=9$
정 암					
정상분전압	109.9	19.99	11.9	8.5	6.67
$V_{kp}$	$\angle -30^\circ$	$\angle 60^\circ$	$\angle 180^\circ$	$\angle -60^\circ$	$\angle -120^\circ$
역상분전압	3.339	19.99	11.9	8.5	6.67
$V_{kn}$	$\angle 0^\circ$	$\angle -60^\circ$	$\angle 60^\circ$	$\angle -180^\circ$	$\angle 120^\circ$

## 3. 負荷特性 및 考察

相變換裝置의 3相 電源으로 3相 誘導電動機의 torque-speed特性과 効率을 求하고, 이것을 基本波만의 3相 電源으로 했을 경우와 비교하였다.

3相 유도전동기의 定格은 다음과 같다.

정격출력 200W 회전속도 1,680RPM

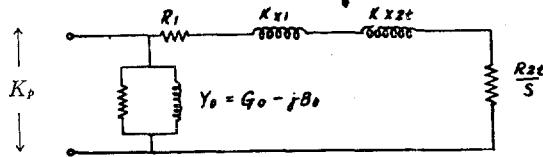
정격전압 200V

全負荷전류 1.4A

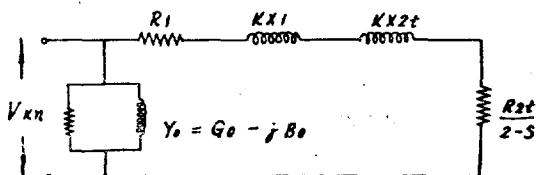
極數 4

무부하시시험, 구속시험으로 전동기의 제정수를 구하여 근사동 가회로를 정상분과 역상분에 대하여 구하면 그림 8과 같다.

(11차 이상의 고조파를 무시하고, 기계적 손실은 무시하며  $K=1, 3, 5, 7, 9$ 이다)



(a) K次 고조파 정상분등가회로

(a) Equivalent cct. of  $K^{th}$  harmonics-positive Com.

(a) K次 고조파 역상분 등가회로

(b) Equivalent cct. of  $K^{th}$  harmonics-negative

그림 8. 전동기 등가 회로도

Fig. 8. Motor-equivalent circuit diagrams

$R_1$  : 1次 1相 저항 $KX_1$  :  $K$ 次 고조파 1次 reactance $KX_2t$  :  $K$ 次 고조파에서 1차로 환산한 2차 reactance $S$  : slip $R_{2t}$  : 1차로 환산한 2차 1相 저항 $Y_0$  : 누설 admittance $V_{kp}$  :  $K$ 차 고조파 정상분 전압 $V_{kn}$  :  $K$ 차 고조파 역상분 전압

$$Z_{kpt} = \frac{1}{G_0 - jB_0 + \frac{1}{R_1 + \frac{R_2t}{S} + j(KX_1 + KX_2t)}}$$

$$Z_{kpt} = R_1 + \frac{R_2t}{S} + j(KX_1 + KX_2t)$$

$$Z_{knt} = \frac{1}{G_0 - jB_0 + \frac{1}{R_1 + \frac{R_2t}{2-s} + j(KX_1 + KX_2t)}}$$

$$Z_{kn} = R_1 + \frac{R_2t}{2-s} + j(KX_1 + KX_2t)$$

정상분에 대해서

$$1\text{차 전류 } I_{kpt} = \frac{V_{kp}}{Z_{kpt}}$$

$$2\text{차 전류 } I_{kpt} = \frac{V_{kp}}{Z_{kpt}}$$

$$\text{Torque } T_p = 3 \sum_k |I_{kpt}|^2 R_2t / s$$

$$\text{역율 } F_{kp} = \cos(\angle V_{kp} - \angle I_{kpt})$$

$$\text{입력 } P_{ip} = 3 \sum_k |V_{kp}| |I_{kpt}| \times F_{kp}$$

역상분에 대해서

$$1\text{차 전류 } I_{kn1} = \frac{V_{kn}}{Z_{knt}}$$

$$2\text{차 전류 } I_{kn2} = \frac{V_{kn}}{Z_{knt}}$$

$$\text{Torque } T_n = 3 \sum_k |I_{kn2}|^2 R_2t / s$$

$$\text{역율 } F_{kn} = \cos(\angle V_{kn} - \angle I_{kn1})$$

$$\text{입력 } P_{in} = 3 \sum_k |V_{kn}| |I_{kn1}| \times F_{kn}$$

정상분과 역상분 전체에 대하여

$$\text{전 torque } T = T_p - T_n$$

$$\text{출력 } P_0 = T(1-S)$$

$$\text{효율 } \eta_1 = \frac{P_0}{P_{ip} + P_{in}} \times 100$$

다음에 기본파만의 3相일 때

$$V_1 = 115.47 \angle -30^\circ \text{ (역상분 전압은 0)}$$

$$Z_1t = \frac{1}{G_0 - jB_0 + \frac{1}{R_1 + \frac{R_2t}{S} + j(X_1 + X_2t)}}$$

$$I_1 = \frac{V_1}{Z_1}, Z_1 = R_1 + \frac{R_2t}{s} + j(X_1 + X_2t)$$

$$I_2 = \frac{V_1}{Z_1}$$

$$\text{torque } T_1 = 3|I_2|^2 R_2t / s$$

$$\text{역율 } F_1 = \cos(\angle V_1 - \angle I_1)$$

$$\text{입력 } P_i = 3|V_1| |I_1| \times F_1$$

$$\text{출력 } P_{01} = T_1(1-S)$$

$$\text{효율 } \eta_1 = \frac{P_{01}}{P_i}$$

여기서 사용된 정수는 무부하 시험과(200[V], 1.14[A], 112.5[W])

회전자 구속시험 (51[V], 1.6[A], 130[W])에서 구하면

$$R_1 = 11.9[\Omega], R_2t = 10.98[\Omega]$$

$$X_1 + X_2t = 21.3[\Omega]$$

$$Y_0 = 0.0028 - j0.0095[\Omega]$$

상기의 식에서 계산된 값은 표 4와 같고 이것을 그리면 그림 9와 같다.

표 4. 기본파와 고조파에 대한 전동기 특성

Table. 4. Motor characteristics vs. fundamental and harmonic

	Slip	0.7	0.5	0.1	0.0667	0.03
기본파 경우	Torque	516.3	549.1	287.97	207.99	102.14
	출력	154.9	274.5	259.11	194.26	99.07
	효율%	15.2	28.6	60.2	57.9	45.5
고조파 경우	Torque	467.5	496.3	260	188	88
	출력	140.25	248.15	234	175.46	85.36
	효율%	12	23	55.4	51.4	40.5

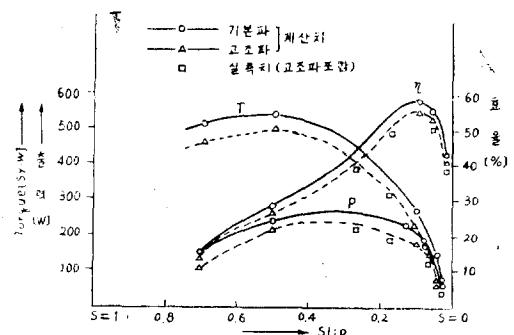


그림 9. 特性比較曲線

Fig. 9. Characteristics-comparison curves

실측치는 전동기를 Dynamometer와 결합시켜 구했다. 그림 9에서 보는 바와 같이 基本波만의 3相파 本實驗의 3相으로 3相유도 전동기를 負荷로 운전하여 求한 특성의 比較에서 近似함을 發見했으며, 本 實驗을 해석하는데 고조파를 무시하여도 거의一致된 결과를 얻을 수 있음을 알 수 있다.

이 때의 선전류  $I_A$ ,  $I_B$ ,  $I_C$ 의 실측파형은 그림 10과 같다.

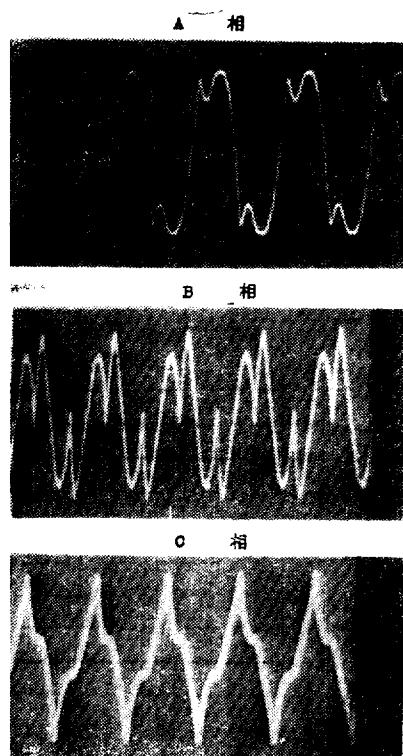


그림 10. 線電流의 파형

Fig. 10. Line current waveforms

#### 4. 결 론

단상에서 3상으로 상변환하는데, 변환장치로 단상 inverter를 사용하였고, inverter 출력파형 중 최악의 파형인 구형파로 상변환, 3相 부하시험을 하여 만족할 만한 결과를 얻었으며, 그려한 inverter의 구형파를 PWM등으로 파형을 개선하면 훨씬 더 좋은 결과가 기대되며, 동이온의 단상을 상변환하여 3상 교류하는 데 기여할 수 있을 것이다.

#### 참 고 문 헌

- (1) 元鍾洙 “전동기 수리” Book, 敎文社, 1972, p. 405
- (2) M.J. Keuper “Operating Experiences with Three phase Motors on Single-phase Line”, IEEE Trans Ind. Gen. Appl., Vol. IGA-2 No. 6, pp. 443~445, Jan/Feb, 1966
- (3) Liwschitz and Whipple “Electric Machines” Vol. II, VanNestrand, Book 1962.
- (4) L.H. Soderholm and Lof. Charity, “Progress on Development of IEEE-ASAE Ruralmotor Starting application guide: IEEE Trans. Ind. Gen. Appl., Vol. IGA-6, pp. 69~70 Jan/Feb 1970
- (5) 朴兪鎬 “單相 線路에 있어서의 3相 電動機의 平衡運轉” 대한 전기학회지 Vol. 24, No. 5, Sep 1975
- (6) F.G Turnbull, “Selected Harmonic Reduction in Static DC-AC Inverters”, July 1964
- (7) Pater and Hoft “Generalized Techniques of Harmonic Elimination and Voltage Control in Thyristor Inverters: Part I-Harmonic Elimination” IEEE Trans. Ind. Appl., Vol. IA-9, No. 3 May/Jun. 1973
- (8) Nayak and Hoft “Optimizing the PWM Waveform of a Thyristor Inverter” IEEE Trans. Ind. Appl., Sep./Oct. 1975