

하이브리드 인버터 설계 및 특성해석에 관한 연구

吳 珍 錫 * , 金 潤 植 **

A Study on the Design and the Analysis of Hybrid Inverter.

Oh Jin-Suck , Kim Yun-Sik

Abstract

PWM (Pluse Width Modulation) induction motor drives are being used in greater numbers through a wide variety of industrial and commercial applications.

In this paper, a new speed control algorithm (hybrid algorithm) for induction motor drives that uses regular sampled PWM and harmonic elimination PWM is presented.

The hybrid algorithm is implemented on the computer to obtain solutions from the calculation equations of the width of the pulses and the firing angles for the selected harmonic elimination.

This paper describes the time delay effects and the suitable compensating methods and moreover, optical transmission system for driving signals is proposed and is compared with general transmission system.

The hybrid inverter was tested with induction motor, and these test results are shown that this hybrid inverter closely approximates and exhibits many of the desirable performance characteristics of hybrid strategies based on digitalized the switching strategies, minimised the total harmonic distortions and eliminated the objectionable harmonics.

Finally, detailed experimental investigation of the proposed hybrid scheme is presented.

* 박사과정 기관공학과 전기제어 전공

** 전기공학과 교수

1. 서론

산업현장의 다양한 분야에서 사용되고 있는 유도전동기는 전기자동차, ROV(Remotely Operated Vehicle)등에 까지 사용범위가 넓어지고 있는 추세이다.

일반적으로 유도전동기의 속도를 제어하기 위하여 PWM(Pulse Width Modulation)인버터를 많이 사용한다. 일반적으로 PWM 인버터는 출력전압이 낮고 스위칭 손실이 크며, 정격주파수 이상에서 유도전동기를 구동시키는 경우 출력전압의 상승을 위한 변환모드가 필요하다.

PWM 인버터는 스위칭 기법에 따라 분류되며, 그 중에서 RSPWM(Regular Sampled PWM) 인버터는 온도변화에 따른 영향이 적고, 잡음 및 회로 정수의 영향을 적게 받으며, 프로그램화된 스위칭 알고리즘을 이용하여 점호각(firing angles)을 결정하는 방법으로 샘플링 위치 및 샘플링 값을 정확히 예측할 수 있다. HEPWM(Harmonic Elimination PWM) 인버터는 수치해석법을 이용해 구한 점호각으로 조파왜곡을 최소화하는 스위칭 기법이다.

본 연구에서는 정격주파수 이하에서는 RSPWM 인버터로 동작하고, 그 이상에서는 HEPWM 인버터로 동작하는 하이브리드 인버터에 관한 연구를 수행하고, 여기에 적합한 인버터 제어알고리즘을 도출한다.

그리고 스위칭 소자의 단락 방지를 위해 설정하는 TD(Time Delay)에 의한 출력성분의 조파왜곡을 방지하기 위해 TD 보상회로를 설계하여 이용하였다.

RSPWM 인버터와 HE 인버터간의 전압차를 줄이기 위하여 CV(Conversion) 모드를 삽입하였다. 그리고, 구동신호의 전송과정에서 유입되는 전자파 영향을 최소화하기 위해 광전송시스템을 이용하였다.

2. 하이브리드 알고리즘

2.1 RSPWM 알고리즘

RSPWM 대칭변조의 파형을 도시한 Fig.1 에서 T_1 순간에 샘플링 되는 기준 변조파 ①의 진폭이 T_4 까지 지속된다. $T_1 \sim T_4$ 구간에서 샘플링 변조파 ②와 반송파 ③이 비교되어 스위칭 시간 T_2 및 T_3 가 결정되고, PWM파 ④는^{1,2)}

$$t_{pw} = \frac{T}{2} [1 + M \sin(\omega_s t)] \quad (1)$$

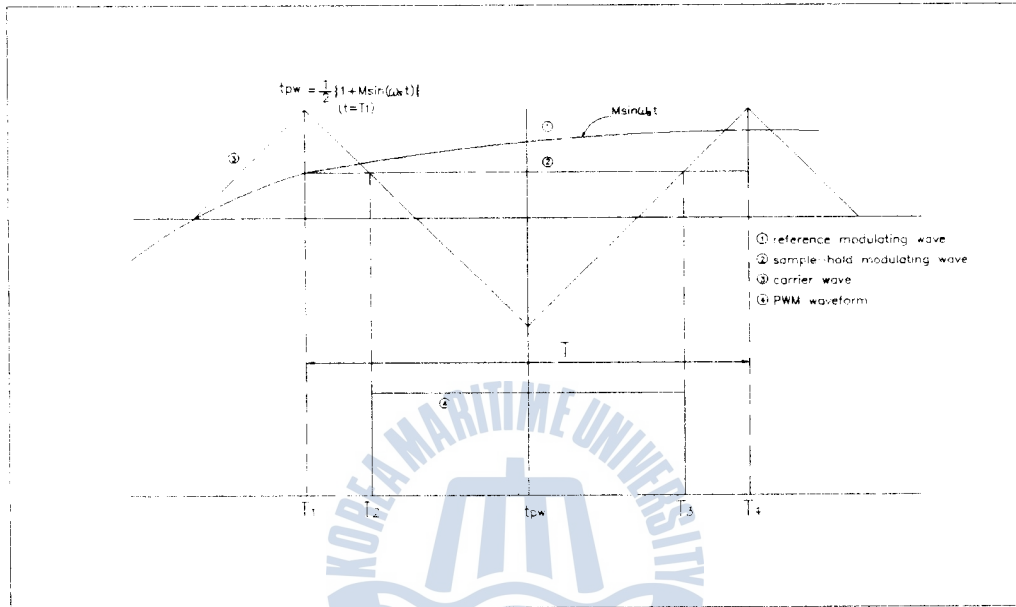


Fig.1 Symmetric modulation waveform of RSPWM

이다. 여기서 t_{pw} 는 펄스폭, T 는 반송파 주기, M 은 변조지수(modulation index), ω_s 는 변조파 주파수, t 는 순간시간이다.

본 연구에서 구축한 RSPWM 알고리즘은 QWS(Quarter Wave Symmetry)특성을 갖춘 것으로, $\frac{1}{4}$ cycle 구간에서 $\omega_s t$ 의 범위는 $0 \leq \omega_s t \leq \frac{\pi}{2}$ 이고 대칭성을 확보하기 위해 $0, \frac{\pi}{2}$ 에서는 샘플링하지 않는다. 샘플링 시작점을 π/R , 종점을 $(\pi/2 - \pi/R)$ 로 하면 샘플링 횟수 $n(=0.1 \cdots (R-1)/4)$ 의 범위는 주파수비 R 에 의해 결정된다. 식 (1)을 위의 조건을 만족하는 디지털화가 용이한 식으로 정리하면^{1,3)}

$$t_{pw} = \frac{T}{2} \left[1 + M \sin \frac{(1+2n)\pi}{R} \right] \quad (2)$$

이 되고, 이 식을 이용하여 RSPWM 알고리즘을 도출한다.

2.2 HE 알고리즘

고조파는 토크에 영향을 주고 진동과 청각소음(acoustic noise)을 야기한다. 고조파 성분

과 전동기의 기계적인 주파수가 공진을 일으키지 않도록 특정한 고조파를 제거하는 것이 HE 알고리즘이다. Fig.2는 HE 인버터의 출력파형을 도시한 것이고, 이 파형을 Fourier 급수로 전개하면^{1,6,9)}

$$f(\omega t) = \sum_{n=1}^{\infty} [a_n \sin(n\omega t) + b_n \cos(n\omega t)] \quad (3)$$

RSPWM 인버터의 출력파형 처럼 Fig.2의 파형도 QWS(Quarter Wave Symmetry) 특성을 갖는다.

즉, $f(\omega t) = f(\pi - \omega t)$ 이고 n 이 기수이면 식(3)의 계수 a_n 및 b_n 은

$$a_n = \frac{4}{n\pi} [1 + 2 \sum_{k=1}^N (-1)^k \cos n\alpha_k] , \quad b_n = 0 \quad (4)$$

이고, $k(=1, 2, \dots, N)$ 는 1/4 cycle 동안의 스위칭 횟수이고 $\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_N$ 은 점호각이다. 이 점호각은 인버터의 출력성분 중에서 a_1 은 최대로, 반면에 $a_n(n=5, 7, 9)$ 는 최소가 되도록 식(4)의 비선형방정식을 수치해석적인 방법을 이용하여 도출한 각도이다. N 개의 자유도 중에서 a_1 의 진폭제어에 한개의 자유도가 이용되면, 나머지 $(N-1)$ 개의 자유도는 고조파 억제에 이용할 수 있다.

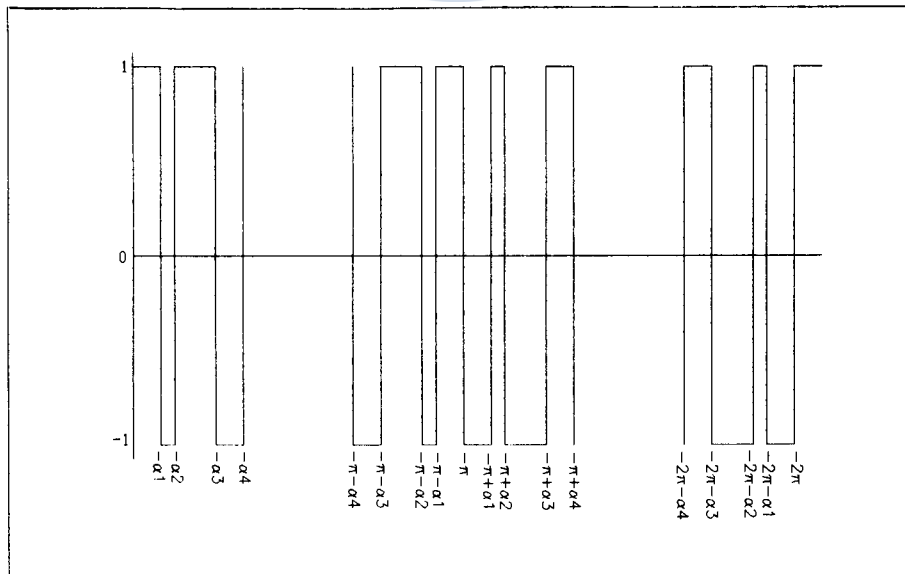


Fig.2 Generalized output waveform of HE inverter

Fig.3은 정호각에 따른 펄스폭을 도시한 것으로⁶⁾ (a)는 스위칭 횟수 $k(=1, 2, \dots, N)$ 가 1인 경우

$$t_{pw1} = T \left(\sin \frac{\pi}{2} - \sin \alpha_k \right) \quad (5)$$

이고, (b)는 k 가 2인 경우

$$t_{pw1} = T \sin \alpha_1 \quad (6)$$

$$t_{pw2} = T \left(\sin \frac{\pi}{2} - \sin \alpha_k \right) \quad (7)$$

이고, (c)는 k 가 3인 경우

$$t_{pw1} = T \left(\sin \alpha_{k-(k-2)} - \sin \alpha_{k-(k-1)} \right) \quad (8)$$

$$t_{pw2} = T \left(\sin \frac{\pi}{2} - \sin \alpha_k \right) \quad (9)$$

의 펄스폭 t_{pw} 산출하는 식이다. 이때 T 는 점호각과 스위칭비에 의해 결정되는 주기이고, α 는 점호각이다.

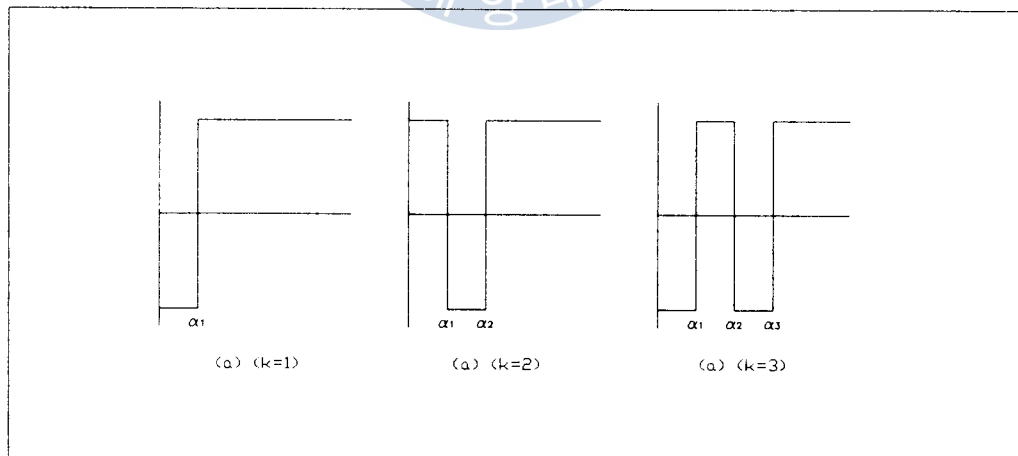


Fig.3 Firing angles and waveforms for eliminating harmonics

2.3 하이브리드 알고리즘

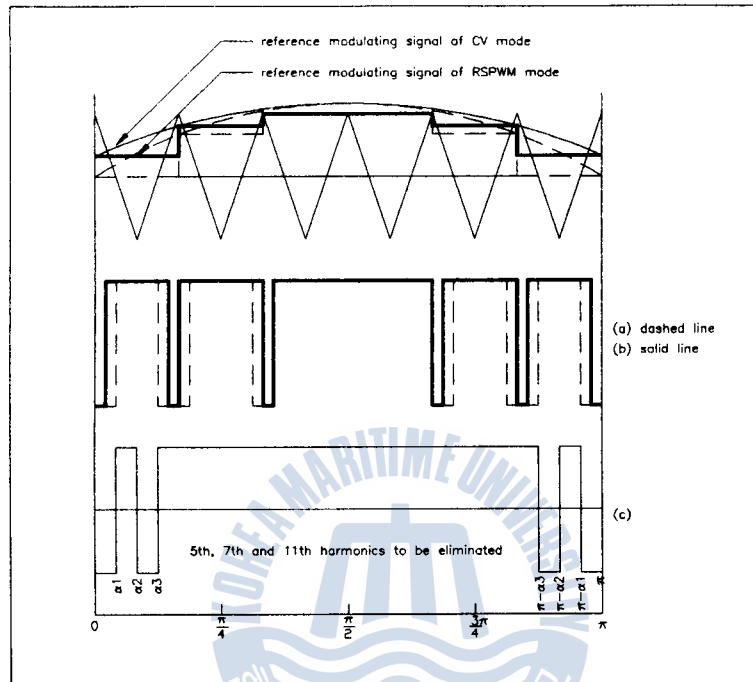


Fig.4 PWM waveforms of RSPWM mode(a), CV mode(b) and HE mode(c)

하이브리드 알고리즘은 QWS 특성을 이용하여 세가지 모드의 알고리즘을 구현하였다.

RSPWM 모드 및 CV 모드에서는 주파수비에 비례하는 점호각을 갖고, HE 모드에서는 제거하려는 고조파 갯수에 비례하는 점호각을 갖는다.

변조파 주파수 f_s 는 유도전동기 속도를 결정하고 변조지수 M 은 고정자 전압을 결정한다. f_s 가 $0 \leq f_s \leq 50$ 이면 RSPWM 모드, $51 \leq f_s \leq 54$ 이면 CV모드, $55 \leq f_s$ 이면 HE모드로 운전한다.

$$t_{pw} = \frac{T}{2} + \frac{K}{2R} \sin(\omega_s t) \quad (10)$$

CV 모드는 RSPWM 모드와 HE 모드간의 전압격차를 줄이기 위해 삽입한 것이며, 주파수비는 12로 하였다.^{3,4,5)}

Fig.4는 모드별 PWM 파형을 도시한 것으로, CV 모드가 두 모드간의 전압격차를 줄이는 중간 모드임을 나타내고 있다.

본 논문에서는 RSPWM 알고리즘의 주파수비와 HE 알고리즘의 스위칭비가 동일한 운영 개념을 갖도록 각각의 주기 최대값을 252로 하고, 이를 근거로 기본파(변조파)주기 T_s , 주파수비(스위칭비 : P) R 및 시스템 주파수 S_c 의 관계를

$$T_s = 252 \times \frac{R \text{ (or } P)}{S_c} \quad (11)$$

로 정립한다.

이상의 과정을 통하여 정립한 하이브리드 알고리즘을 이용하여 인버터를 구축하고, 인버터 특성실험을 원활히 수행하기 위하여 연산처리, 모드설정 및 입출력이 자유로운 C언어를 이용하여 제어프로그램을 작성하여 실험을 수행하였다.

3. 인버터 구성

3.1 개요

인버터는 동력원에 따라 요구성능의 범위가 조금씩 다르다. 본 논문에서 산업용은 물론이고, 전기자동차 및 ROV 등에도 이용할 수 있는 인버터가 되도록 구성하고자 한다.

Fig.5는 인버터를 개략적으로 도시한 것이다.

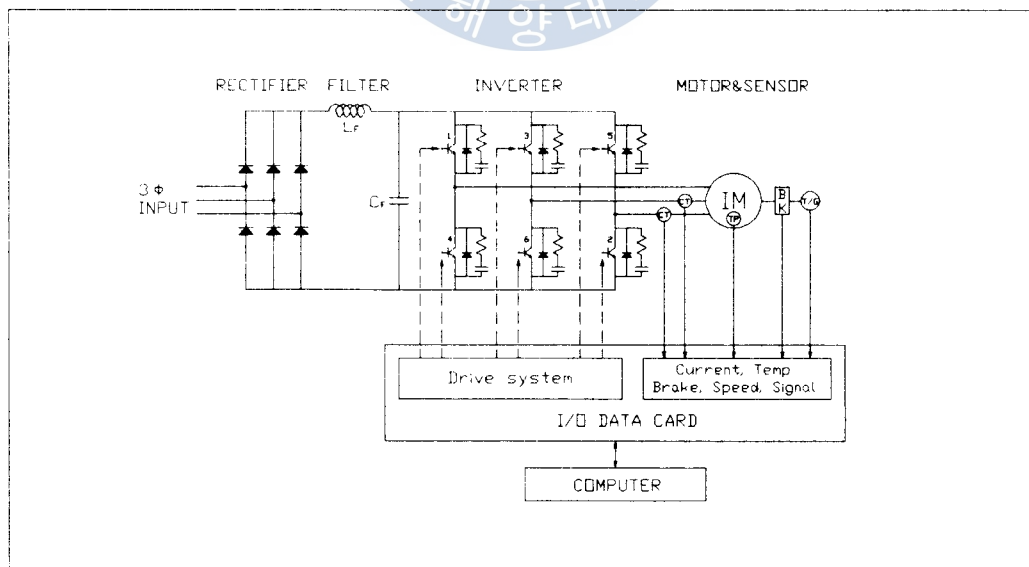


Fig.5 Schematic diagram of inverter

인버터를 구성하고 있는 것 중에서 I/O 데이터카드는 하이브리드 알고리즘으로 산출되는

구동신호 발생용 데이터에 비례하는 TTL 신호를 만들어서, 그 신호를 스위칭 소자인 트랜지스터의 베이스에 인가하는 과정을 원활히 수행하기 위해 필요한 것이고, 클럭 발생회로는 하이브리드 알고리즘에 적합한 시스템 클럭을 발생하기 위해 구성된 회로이며, 로딩 회로는 도출된 펄스폭 데이터(t_{pw})를 8253에 로딩하기 위해 필요한 회로이다.

이러한 회로와 더불어 인버터의 출력특성을 개선하기 위해 TD 보상회로를 구성하였으며, 더불어 전자파 잡음에 내성이 강한 전송매체를 제시하였다.

3.2 TD 보상 회로

직류측에 직렬로 연결된 스위칭 소자의 단락을 방지하기 위해 설정하는 TD(Time Delay)는 인버터의 출력에 고조파 성분을 포함시킨다.

Fig.6은 인버터의 한상을 보여주고 있다. 여기서 부하전류(i_L)는 반사이클 동안은 양(+)이고, 반사이클 동안은 음(-)이다.

Fig.7은 TD의 영향을 반영한 출력파형이다. a 는 이상적인 출력파형, b , c 는 스위칭 소자 제어신호, d 는 실제적인 출력파형, e 는 $d-a$ 의 차전압이다. 이 차전압 V_e 는 직류 공급전압 E , 스위칭 주기 T_s 및 시간지연 t_d 와 충전시간 t_s 의 차 $t_e(=t_d-t_s)$ 로 나타낼 수 있다.^{5,6)}

$$V_e = E \cdot \frac{t_e}{T_s} \quad (12)$$

TD를 보상하지 않는 경우의 THD(Total Harmonic Distortion)는 t_d/T_s 에 의해 증가한다. TD를 보상한다는 것은 t_d/T_s 에 영향을 받지 않고 TD에 의해 발생하는 고조파를 억제하는 것이다.

본 연구에서 구성한 TD 보상회로는 전류가 양(부하측으로 흐름)이면 TR_1 의 트리거 타이밍을 이상적인 파형의 전압천이와 일치시키고, 음이면 TR_2 의 트리거 타이밍을 이상적인 전압천이와 일치시킨다.

f , g 는 TD가 영인 경우이고, h , i 는 부하전류가 양, j , k 는 부하전류가 음인 경우 출력 전압의 천이를 이상적으로 하기 위한 스위칭 신호이다.

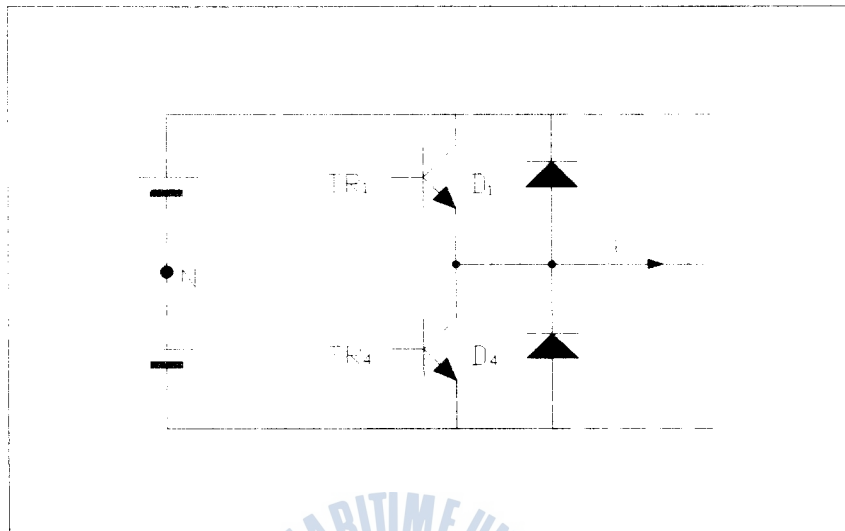


Fig.6 One phase circuit of inverter

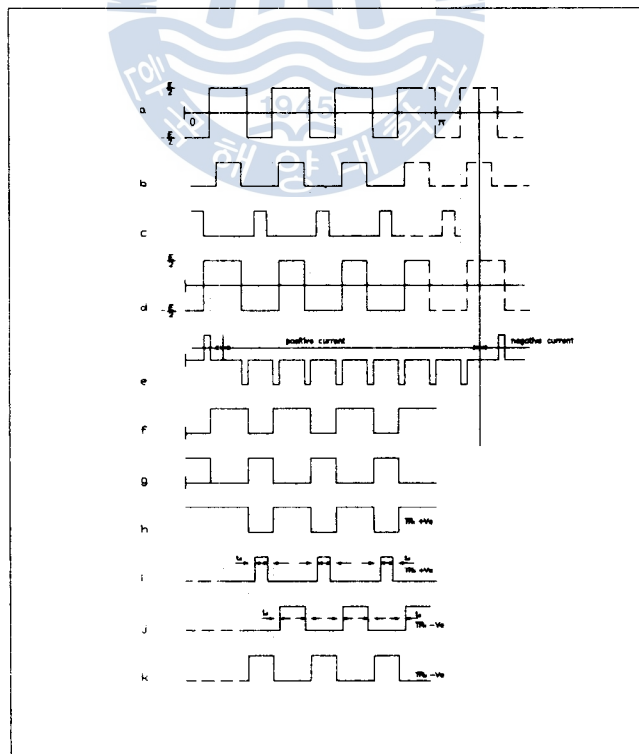


Fig.7 Effect of TD on the inverter waveforms

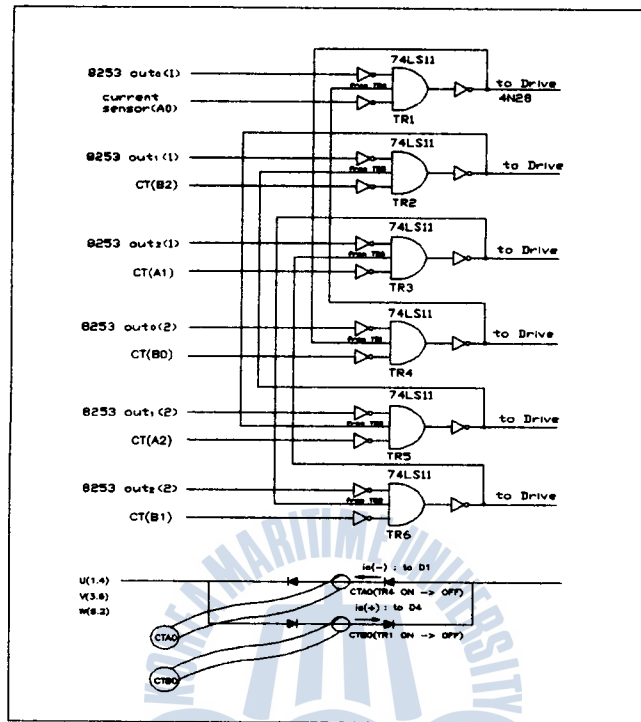


Fig.8 TD Compensation circuit

Fig.8은 TD 를 보상하는 TD 보상회로도이며, 여기에 이용한 전류센서는 $0.01 \sim 0.21[A]$ 까지는 선형성을 가지며 그 이상에서는 포화된다.

3.3 광 전송시스템

주 전력회로에서 유도되는 이상전압 및 EMI(Electromagnetic Interference)같은 전자파 간섭과 구동신호의 전송과정에서 유입되는 잡음의 영향을 최소화하기 위하여 광 전송시스템을 이용한다. 본 연구에서 구축한 광 전송시스템은 케이블 길이가 짧고, 광량이 충분히 확보되므로 S/N(Signal-to-Noise) 비를 고려하지 않았다. 그리고, LOS(Loss of Signal) 같은 입력신호의 유무를 감시하는 회로도 부가하지 않았다.

Fig.9는 광 전송시스템으로, 여기서 트랜스미터는 전기신호를 광출력으로, 리시버는 광신호를 전기신호로 바꾸는 것이다.⁸⁾

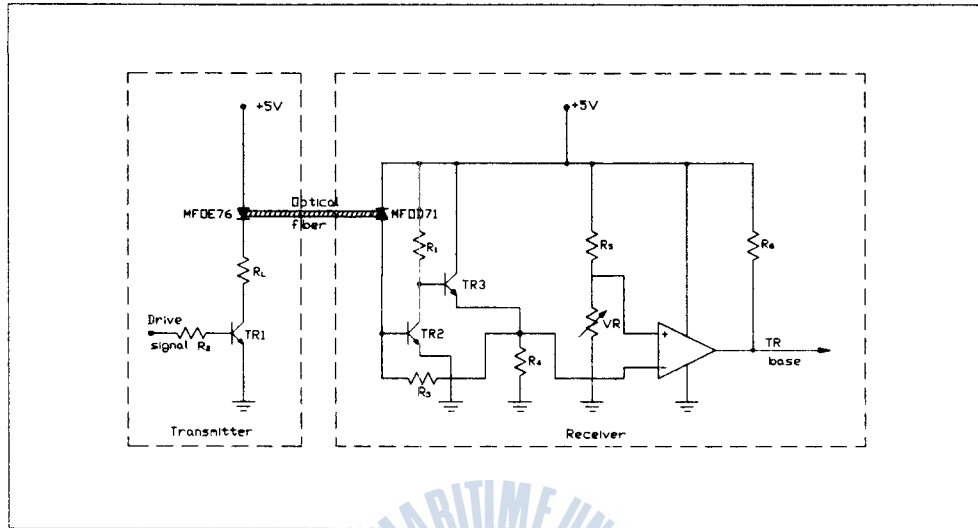
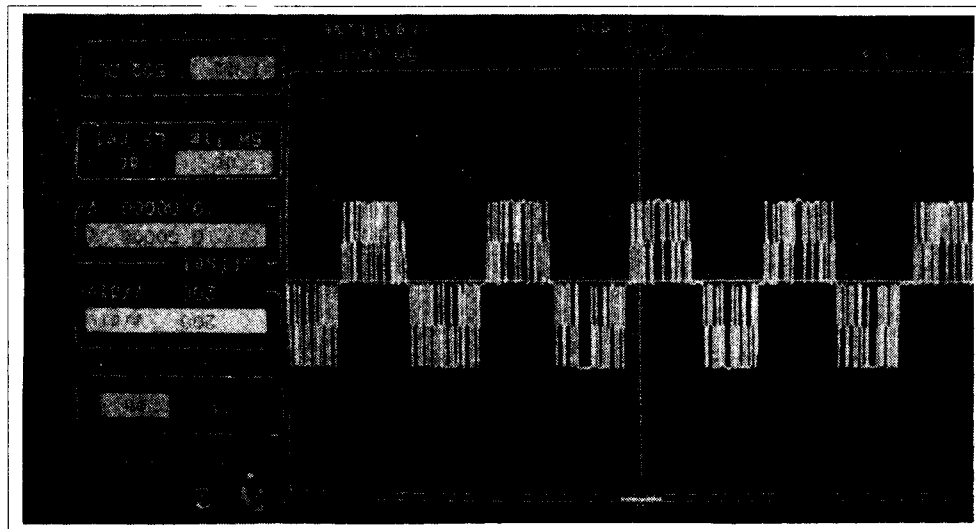


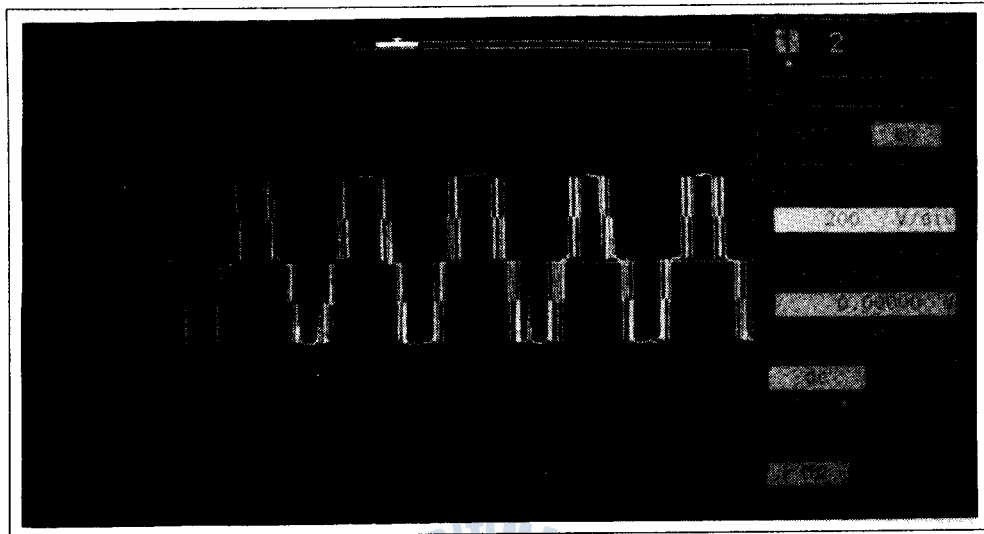
Fig.9 Transmitter and receiver circuits of Optical transmission system

4. 실험 결과 및 고찰

유도전동기(220V, 1656RPM, 1HP)로 실험하는 과정에서 스위칭 소자의 충전시간 (storage time) 및 스너버에 의한 시간지연은 구동회로의 시간지연과 근사치가 유사하다고 보고 고려하지 않았다.⁷⁾



(a)



(b)

Fig.10 Output line voltage waveforms of the inverter. (a)CV mode (b)HE mode

Fig.10은 CV 모드로 운전할 경우 (a)와 HE 모드에서 구한 점호각을 출력파형 검증실험으로 수정한 점호각으로 5차 및 7차 고조파를 제거하는 경우 (b)의 선간전압 파형이고, Fig.11은 Fig.10과 동일한 조건으로 촬영한 전류성분에 대한 주파수 스펙트럼 분석파형이다.

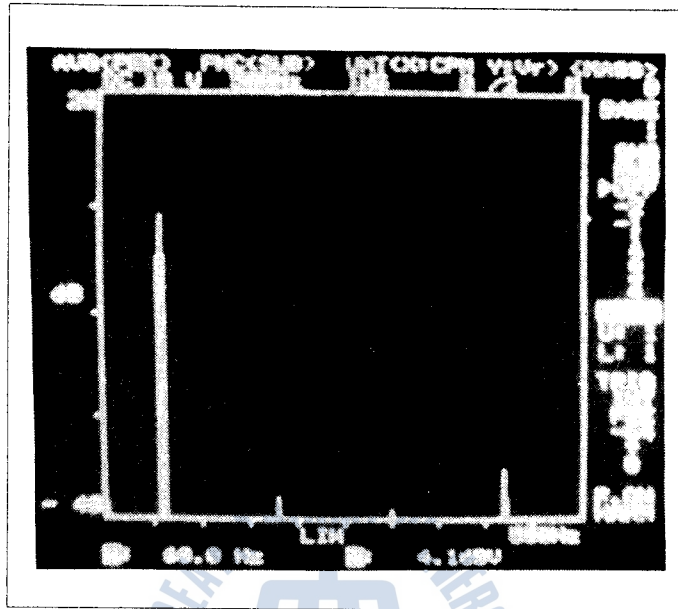
수치해석법으로 구한 점호각을 수정없이 이용하면 고조파가 효과적으로 제거되지 않는다. 그러므로 실험을 통하여 디지털화가 용이한 수정 점호각을 구하여 이용해야 한다.

실험결과 Fig.11에 나타난 것처럼 고조파가 완전히 억제되지 못하였다. 우수한 고조파 억제능력을 갖추기 위해서는 체계적인 검증실험 방법이 정립되어야 할 것이다.

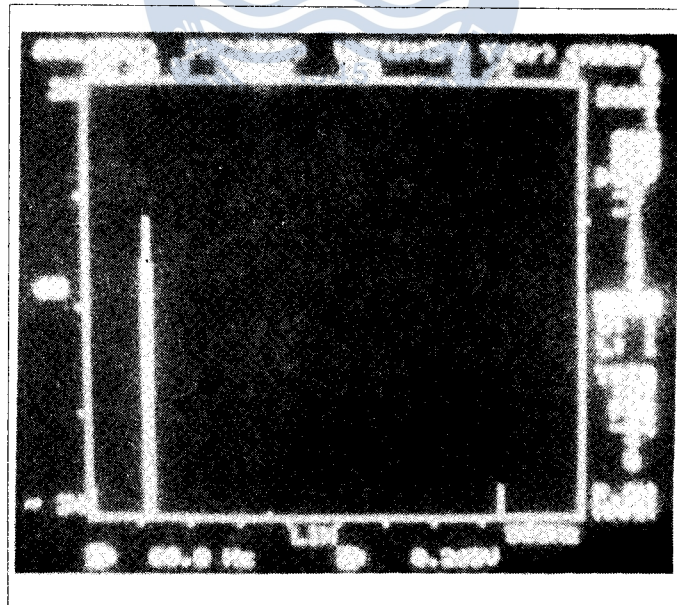
Fig.12는 TD 보상회로의 보상능력을 실험한 결과로서 약간의 전류왜곡을 포함하고 있다. 이 왜곡성분은 전류센서의 특성과 턴수의 영향 및 회로정수를 보상하지⁷⁾ 않은 결과로 사료된다.

광 전송시스템의 전송특성 실험은 예상한 대로 잡음 및 EMI에 대한 내성이 우수하였다.

Fig.13은 일반 전송시스템(위)과 광 전송시스템(아래)의 구동신호 전송상태를 촬영한 것으로, 일반 전송시스템에 많은 잡음이 실린 것을 알 수 있다. 실제 실험과정에서도 일반 전송시스템을 이용한 경우 구동회로의 전자부품 손상이 자주 발생한 반면, 광 전송시스템은 거의 발생하지 않았다.

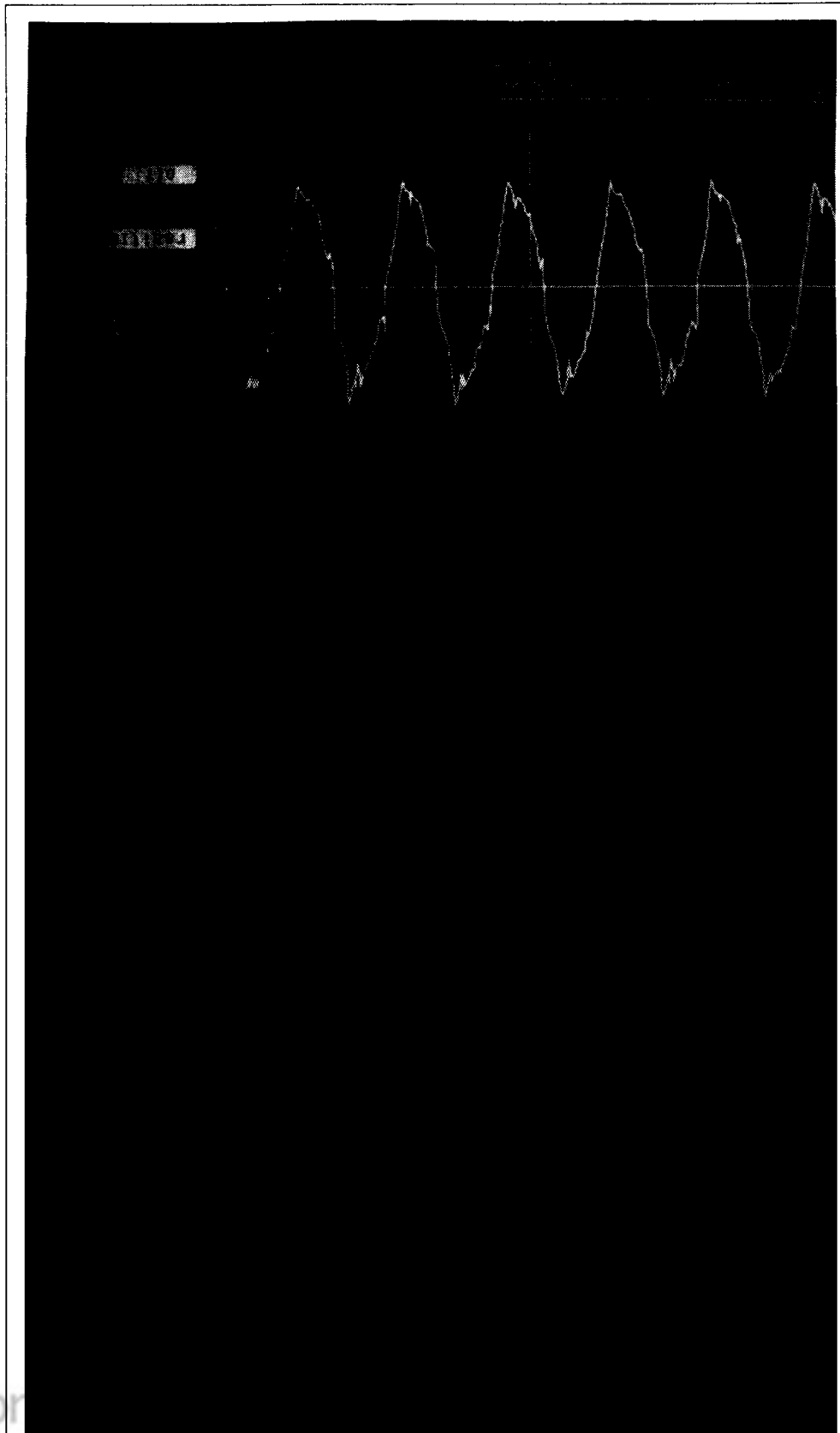


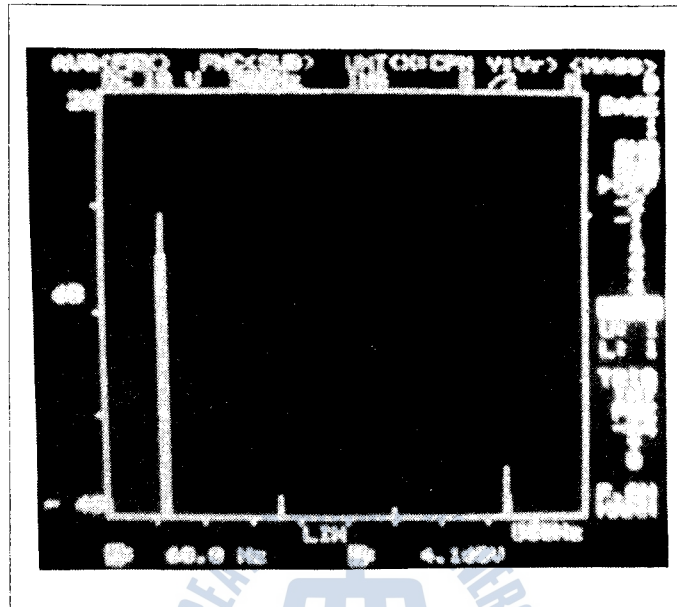
(a)



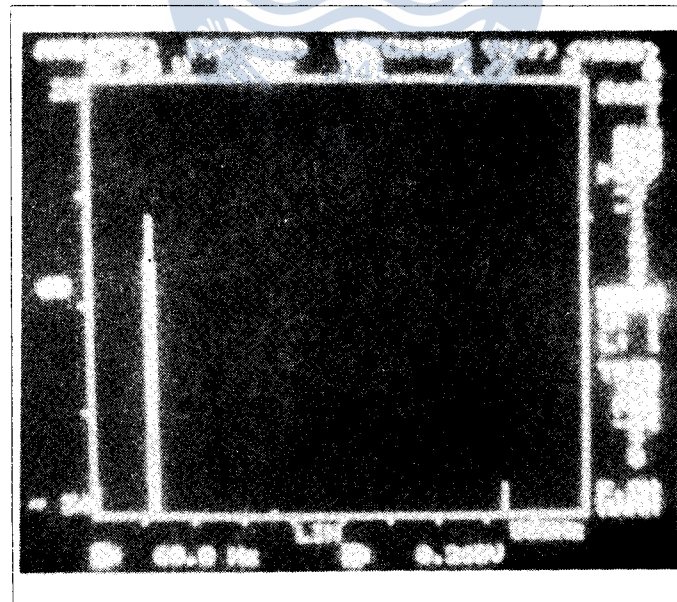
(b)

Fig.11 The motor line current spectrum at 60HZ (a)CV mode (b)HE mode



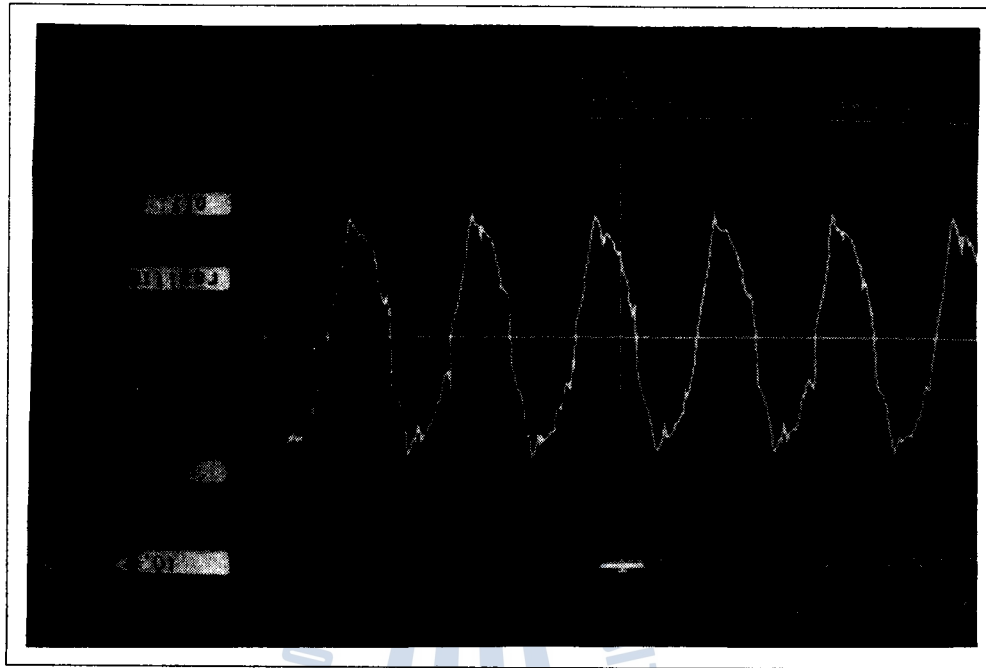


(a)

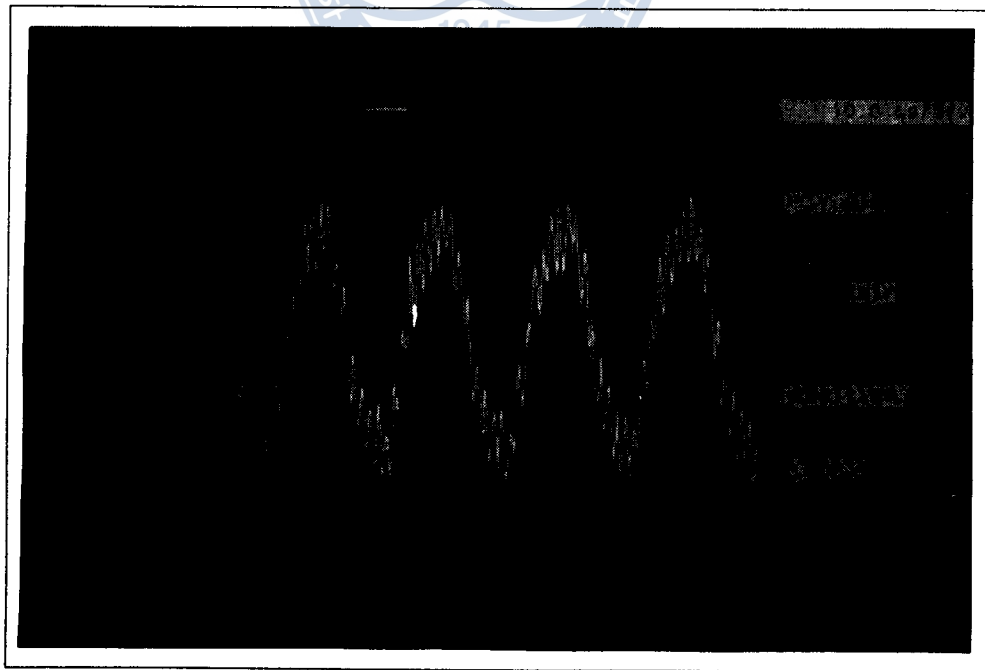


(b)

Fig.11 The motor line current spectrum at 60HZ (a)CV mode (b)HE mode



(a)



(b)

Fig.12 Inverter output current waveforms with TD circuit(a) and without TD circuit(b)

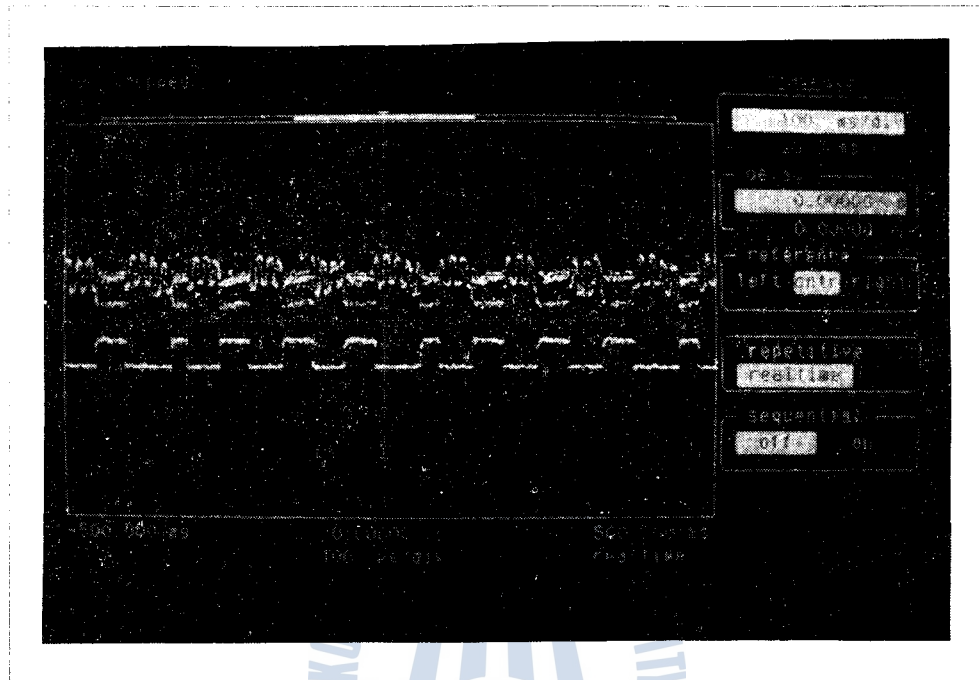


Fig.13 Drive signal waveforms of general[upper] and optical[lower] transmission system

5. 결론

본 논문에서는 RSPWM 알고리즘과 HE 알고리즘을 기초로 하는 새로운 하이브리드 알고리즘을 구축하고, 이를 이용하여 유도전동기 속도제어를 수행하였다.

이 방법은 비트현상으로 발생하는 고조파를 억제할 수 있고, 주파수비에 따라 누설리액턴스가 변화되며, 그 결과 고조파 성분에 대해 적절한 임피던스로 작용하게 된다. 그리고 급격한 전압천이를 억제하기 위하여 CV 운전모드를 삽입하여, 전 구간에 걸쳐 전압격차에 의한 운전상태 불안정을 방지하였다.

TD 보상회로를 이용하여 인버터의 전력변환율을 향상시키고, 전기자동차와 ROV 같은 전차과 간섭이 집중되는 곳의 새로운 전송매체를 제시하였다.

또한, 하이브리드 알고리즘의 원활한 수행을 위하여 I/O 데이터카드를 만들어 이용하였으며, 스너버회로의 크기별 특성을 고찰하고, 하이브리드 인버터와 유도전동기의 특성해석을 통하여 간단한 해석방법과 모드별 전압특성을 정리하였다.

이러한 실험과정을 통하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 제시한 하이브리드 알고리즘은 전 구간에 걸쳐 펄스폭의 값을 예측할 수 있고, QWS 및 HWS 특성을 이용하여, 1 cycle에 해당하는 펄스폭 결정용 값을 도출하므로써, 펄스폭 계산과 PWM 펄스신호 발생을 온라인(on-line) 상태로 수행함으로 데이터 저장방식의 PWM 알고리즘에 비하여 요구되는 메모리 용량이 매우 적다.
2. 제시한 하이브리드 인버터가 유도전동기와 공진을 야기하는 고조파 주파수를 정확히 제어할 수 있도록 HE 알고리즘에서 도출한 점호각을 검증실험으로 수정하여 이용함으로써 이산화과정 및 회로정수 산정과정에서 발생하는 오차에 대하여 신뢰성을 갖도록 하였다.
3. RSPWM 알고리즘의 주파수비와 HE 알고리즘의 스위칭비가 동일한 운용개념을 갖도록 시스템클럭 발생회로를 제작하여, 이 회로를 이용하여 시스템클럭을 제어하였다. 더불어 입출력 제어가 자유로운 C 언어로 이를 운용하는 제어프로그램을 작성하여 이용하였다. 그 결과 전 구간에 걸쳐 동기화된 출력특성을 얻었다
4. TD 보상회로를 이용하여 시간지연의 영향을 보상하는 실험을 수행한 결과, 보상효과(조파왜곡개선)는 전류센서의 특성에 지배를 받았고, TD 보상회로가 우수한 보상능력을 갖기 위해서는 회로의 시간지연, 스위칭 소자의 충전시간, 스너버 영향 등을 고려하는 것이 바람직할 것으로 사료된다.
5. 인버터에 이용되는 스위칭 소자의 스위칭 순간 유도되는 이상전압 및 유도잡음 등에 내성이 강한 전송매체를 도출하기 위해, 광 전송시스템을 이용하여 전송특성 실험을 수행하였다. 그 결과 전자파 잡음 및 EMI에 대하여 우수한 내성을 가진 것으로 판명되었다. 그러므로 광 전송시스템은 전기자동차 및 ROV와 같이 전자파 간섭이 집중되는 것의 제어신호 전송시스템으로 적합할 것으로 사료된다.

이상의 연구결과를 이용한 보다 우수한 하이브리드 인버터를 구성하기 위하여, 점호각 도

출을 위한 검증실험 방법을 체계적으로 구축하고, TD 보상회로를 위한 회로정수 및 회로의 동작시간 산출방법을 정립하여야 한다. 그리고, 광 전송시스템의 실용화를 위하여, 집합기술을 확보하여야 하며, 유도성 부하에 대한 인버터의 출력특성 변화에 관련된 연구와 회생제동에 관련된 연구가 요망된다.

더불어 제시한 하이브리드 인버터를 전기자동차 및 ROV 등에 활용하기 위해서는 주파수에 대비한 토크특성, 속도에 대비한 토크궤적 및 인버터와 유도전동기의 조화관계를 고려해야 하며, 인버터의 전류정격에 대한 연구도 충실히 수행하여 신뢰성을 갖춘 인버터가 되도록 하는 것이 향후 과제로 남아 있다.



참고 문헌

1. 오진석, 김윤식, "하이브리드 RSPWM 인버터의 설계 및 특성해석에 관한 연구", 한국박용기관학회지, Vol.19, No.1, 1995
2. K. E. Addoweesh, W. shepherd and L. N. Hulley, "Induction Motor Speed Control Using a Microprocessor-Based PWM Inverter", IEEE Trans., Vol.36, No.4, p516~522, 1989.
3. C. C. Chan and W. C. Lo, "Control Strategy of PWM Inverter Drive System for Electric Vehicles", IEEE Trans., Vol IE-34, No.4, 1987.
4. P. Enjeti and P. D. Ziogas, "New Current Control Scheme for PWM Inverter", IEE Proc. , Vol.135, No.1, 1988.
5. S. Garcia-otero and M. Devaney, "Minimization of Acoustic Noise in Variable Speed Induction Motor Using a Modified PWM Drive", IEEE Trans., Vol.30, No.1, 1994.
6. P. N. Enjeti and P. D. Ziogas, "A New PWM Speed Control System for High-Performance AC Motor Drives", IEEE Trans., Vol.37, No.2, 1990.
7. 오진석, "PWM 인버터용 SNUBBER 설계", 한국산업안전학회지, Vol.8, No.4, 1993.
8. J. Gowar, "Optical Communication Systems", Prentice-Hall, 1993.
9. 아카데미, "신 C언어 수치해석", 크라운 출판사, 1992.