

유도전동기 속도검출을 위한 최적 제어시스템에 관한 연구

* 이강연 ** 이진섭 * 조금배 * 이상일 * 백형래
** 포스콘 기술연구소 * 조선대학교

A Study on the Optimum Control System for AC Motor Speed Detection

* K.Y Lee ** J.S Lee * G.B Cho * S.I Lee * H.L Baek
** POSCON R&D Center * CHOSUN University

Abstract - In this paper, a instantaneous speed measurement method using a three phase sinusoidal encoder is described and it's simulations are developed. The proposed method can easily detect the AC motor speed by using that the encoder is proportion to the AC motor speed.

The performance of proposed method is confirmed by computer simulation and experiment results. The high accuracy of the optimum control system, AC motor speed detection is designed and proposed.

1. 서론

최근 교류전동기 구동분야는 부하설비, 모터용량, 엔코더특성 등에 따라서 속도 검출 방법이 다양하게 구현될 수 있으며, 고정밀 고속 검출기의 출현으로 벡터제어용 전동기의 제어가 활발하게 산업 분야에 적용되고 있다.

고속 고정밀 속도제어를 원활하게 실현하기 위해서는 필연적으로 회전자의 정확한 속도정보가 필요하고, 이는 속도검출 센서를 이용하여 전기적인 신호로 변환하여 얻게 된다. 그러나 이를 센서들을 이용하여 정밀한 속도정보를 얻는데는 운전속도에 따라서 한계를 가질 수 있으므로 구동시스템의 성능향상에 문제 요소로 작용하게 된다. 이 문제의 해결 방안으로 고분해능의 센서를 이용할 경우에는 저속에서는 보다 정밀한 속도 측정이 가능하나 분해능이 높

을 수록 센서 가격이 고가이고 프로세서에서 처리할 수 있는 최대 주파수가 한정되어 있으므로 고속에서 정확한 속도정보를 얻기 어렵다. 뿐만 아니라, 구동장치의 설치 환경에 따라 센서 선정을 충분히 고려해야 한다.

실질적으로 속도검출에 대한 알고리즘은 다양하게 연구 및 실용화 되고 있으나, 검출기의 특성을 분석하여 최적제어를 위한 속도검출 방법이 산업현장에서는 절실히 요구되고 있다. 본 연구에서는 검출기와 속도측정기 설계시 고려되어야 할 주요내용을 고찰 하였으며 검출기 선정 및 최적 검출제어 시스템에 대하여 검토하였다.

2. 속도측정을 위한 시스템 모델링

전동기에 엔코더를 부착한 기계계의 모델링은 그림1과 같이 표현된다.

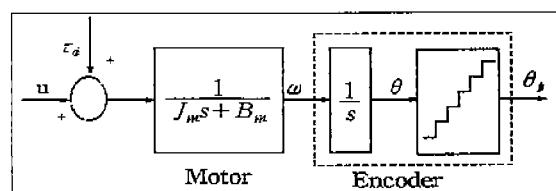


그림 1. 기계계의 모델링

전동기의 역학적 시스템의 방정식은 다음과 같다.

$$J_m \frac{d\omega}{dt} + B_m \omega = u + \tau_a \quad (1)$$

여기서, ω : 회전자의 기계 각속도(rad/sec)

J_m : 관성 모멘트(kg·m²)

B_m : 마찰계수(Nm/(rad/sec))

u : 구동토오크(Nm)

τ_d : 부하외란(Nm).

증분형 엔코더는 실제로 위치검출기 이므로 기계계의 출력은 위치정보로 회전자의 속도는 회전자의 미분으로부터 계산된다. 따라서 기계계의 출력은 위치이며 이로부터 속도는 다음과 같은 수식으로 표현된다.

$$\frac{d\theta}{dt} = \omega \quad (2)$$

여기서, θ : 각위치.

외란의 변화는 제어기의 샘플링 주기에 비해 매우 늦으므로 부하토크는 일정하며 그 미분값이 0이라고 볼 수 있다. 따라서 다음과 같이하여 외란을 상태변수로 도입한다.

$$\frac{d\tau_d}{dt} = 0 \quad (3)$$

식 (1), (2)와 (3)으로부터 상태방정식은 다음과 같다.

$$\frac{dx}{dt} = Ax + Bu, \quad y = Cx \quad (4)$$

여기서,

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & -\frac{B}{J} & -\frac{1}{J} \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad B = \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{1}{J} \\ 0 \end{bmatrix}$$

$$C = [1 \ 0 \ 0], \quad x = \begin{bmatrix} \theta \\ \omega \\ \tau_d \end{bmatrix}$$

$$y = \theta, \quad u = T_e \quad (5)$$

여기에서 입력변수는 토크지령치 u 이며 상태변수로는 기계적 각속도 ω , 기계적 각위치 θ 그리고 외란 τ_d 가 되고 출력변수는 기계적 각위치 $y = \theta$ 가 된다.

3. 유도전동기의 운전 특성

일반적으로 일정주파수의 상용전원에서 운전되던 유도전동기는 인버터 응용기술의 발전에 따라서 복잡한 제어가 가능하게 되었다.

전원전압과 주파수가 일정할 경우 토크-속

도 특성을 슬립의 함수로 나타낼 수 있으며 정격속도 부근에서 토크특성은 슬립에 대하여 선형함수로 근사화 될 수 있는데 동기속도에서 최대토크가 나오는 지점까지의 영역이 안정동작점이 되고 최대토크를 벗어난 영역은 불안정 동작점이 되어 부하가 있을 경우 회전자 속도가 점점 떨어져 정지하게 된다.

안정동작점에서 전동기가 운전이 될 경우에 부하가 질리면 속도가 떨어지면서 슬립이 커지고 토크가 증가하여 다시 속도를 증가 시키게 된다.

유도전동기 속도제어는 입력되는 전압과 주파수의 가변을 통해 이루어질 수 있는데 이에 따른 속도범위는 그림2와 같이 정격속도 이하의 일정 토크 영역, 정격속도 이상의 일정 출력영역과 슬립주파수가 최대로 유지되는 브레이크다운 토크 영역(약제자 영역)의 세가지 영역으로 나눌 수 있다.

3.1 일정 토크 영역

정격속도 이하의 속도영역으로서 유도전동기는 직류전동기와 유사하게 자속을 일정하게 유지하고 발생 토크는 전류를 가변하면서 제어한다.

이와같은 특성을 얻기위해서는 운전주파수를 증가시키는것과 동시에 전압을 증가시킴으로서 자속을 일정하게 유지 한다. 따라서 어떠한 속도에서도 정격 토크를 얻을수 있고 전동기가 발생할수 있는 최대토크는 전류에 의해 제한된다.

3.2 일정 출력 영역

정격 속도 이상에서는 인버터에 의해 전동기에 인가될수 있는 전압이 제한되기 때문에 이 영역에서 유도전동기는 일정전압으로 운전된다. 따라서 속도 증가를 위해 운전주파수가 증가함에 따라서 자속은 감소하게 되어 전동기의 최대 출력 토크는 속도의 제곱에 반비례 한다. 그러나 이 영역에서는 슬립주파수를 증가 시킴으로서 전류를 일정하게 유지시킬 수 있기 때문에 전동기의 출력 토크는 속도에 반비례하여 감소하게 된다. 이 영역에서는 전압과 전류는 일정하므로 일정 출력으로 운전된다.

3.3 브레이크다운 토오크 영역

일정 출력에서 운전 주파수가 점차 증가하여 슬립 주파수가 그 최대치에 도달할 경우 더 이상 슬립주파수를 증가시킬수 없기 때문에 전류는 감소하게 되고 그결과 출력 토오크는 속도의 제곱에 반비례하여 감소하게 된다. 따라서 이 경우 전류의 감소로 인하여 출력은 일정하게 유지되지 못한다.

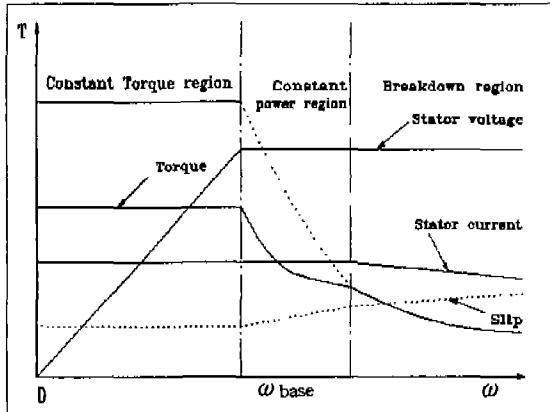


그림 2. 유도전동기의 특성 곡선

위와같은 유도전동기 세가지 속도영역의 범위는 전동기의 극수에 따라 달라지게 되는데 그림3과 같이 여러 극수에 대한 속도영역을 나타낼 수 있다.

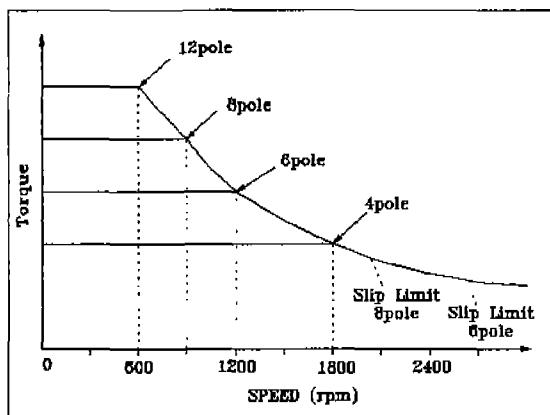


그림 3. 유도전동기의 속도영역

4. 검출기 신호전송

신호전송은 인터페이스 표준인 RS-422 평형 듀플렉스 전류 인터페이스 회로를 통해 TTL 레벨로 전송하면 된다.

이 경우 TTL은 역전압이 $V_{LOW} \leq 0.5V$, V_{HIGH}

$\geq 2.5V$ 로서 신호-노이즈비가 낮지만 반전 신호가 있기 때문에 비교적 안전하게 전송 할 수 있다. 간접파는 공통모드에서 모든신호에 주첩되므로 신호와 반전신호 사이의 차, 즉 차직정보는 보존된다. 그러나 입력단의 차동 증폭기가 공통모드 간섭을 배제하는데는 한계가 있다.

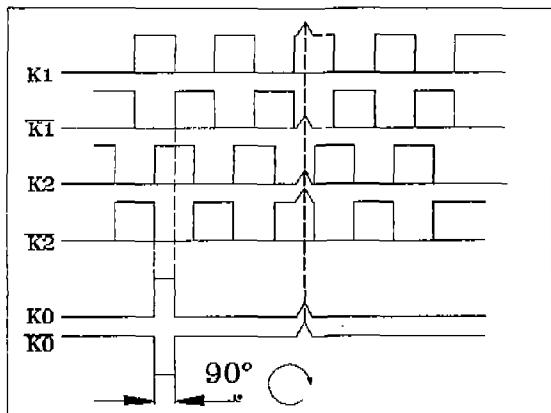


그림 4. 검출기 신호 출력 파형

4.1 RS-422 전송

검출기 신호를 TTL레벨로 장거리 전송을 하면 내외부의 간섭뿐만 아니라 다른 한계도 있다. 회전당 필스수가 1000개인 검출기가 6000rpm으로 회전하게 되면 100KHz의 구형파가 출력된다. 이 경우 주파수 스펙트럼이 MHz 단위까지 이르게 되는데 케이블 종단에서의 신호의 반사를 피하기 위해서는 케이블 임피던스와 정합되는 부하를 연결해야 한다. 검출기 주파수가 100KHz 정도면 캐패시터가 단락된 것처럼 되기 때문에 라인 드라이브로 부터 케이블 부하 임피던스 쪽으로 돌발적인 전류가 흐르는데 신호가 겹치는 구간에서는 100mA 정도에 까지 이른다. 검출기 자체의 소비전류까지 고려하면 200mA 정도의 전류가 검출기로 공급되어야 한다. 이 전류에 의해 입력리드에 전압강하가 생겨 허용오차 $+5V \pm 5\%$ 를 쉽게 벗어난다. 이를 보완하기 위해서 다음과 같이 제안하였다.

첫째, 전원공급용으로 사용되는 리드는 직경이 더 큰 특수 케이블을 사용하여 전원 공급용으로는 몇 개의 리드를 병렬 연결하여 사용 한다.

둘째, 검출기에 전압 센서를 부착하여 리드에 의한 전압강하분 만큼 보상 한다.

셋째, 검출기 내부에 레귤레이터 IC를 장착하여 전압을 $+5V$ 로 낮추어 사용한다.

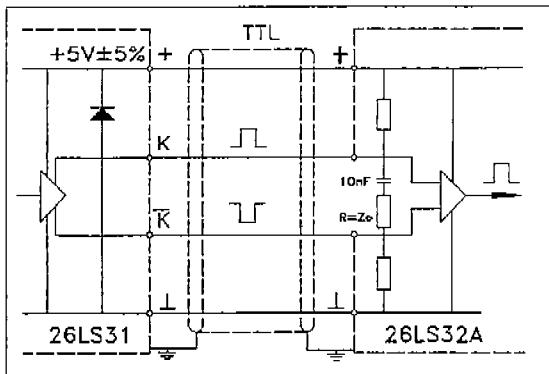


그림 5. RS-422 전송

4.2 HTL 전송

검출기에서 발생한 전압은 전압강하가 거의 없이 케이블로 전달된다. 이때 케이블의 임피던스는 거의 타코 회전자 저항과 비슷한 값을 갖는다. 과도전압이 발생하면 유해한 전류파가 양방향으로 퍼져 나간다. 직류 타코의 경우 내부 저항이 낮기 때문에 유해전류가 반사되지 않고 억제된다. 이러한 아날로그에서의 기법은 디지털 기술에도 그대로 적용될 수 있다.

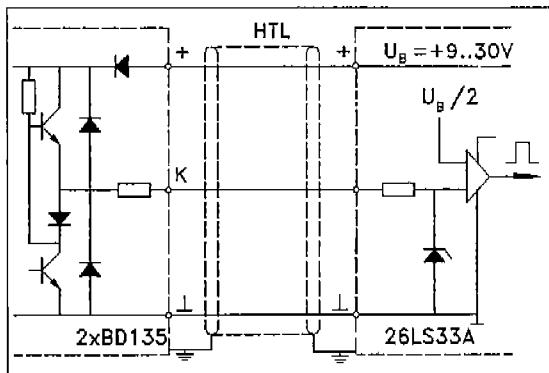


그림 6. HTL 전송

데이터 전송을 안전하게 하기 위해서 신호 레벨은 높이고 신호원의 내부저항은 낮춘다. HTL(High Tension Logic)은 $V_B = +9V \dots 30V$ 의 전원전압에서 작동된다.

HTL 검출기의 출력단은 보통 파워 트랜지스터로 구성되어 있다. 출력의 크기는 $V_{LOW} = 1.5V$, $V_{HIGH} = -3.5V$ 로서 TTL 전위 보다 높다. 출력단의 써미스터(PTC)는 단락이 되었을 때 지속적인 전류의 흐름을 제한하는 역할을 한다. 다이오드는 공급전원의 극성을 바꾸어 연결하거나 과도적인 유해전압으로 인해 트랜지스터

에 역전압이 걸리는 것을 막는다. 케이블길이가 100M이고 단위 길이당 캐패시턴스가 $100pF/m$ 이면 각 라인 드라이브에 $10nF$ 의 부하를 걸어 준다.

4.3 OCR 전송

OCR(Opto Coupler Receiver)를 사용하여 유해전압으로부터 신호를 최대한 보호한다. 리드에 가해지는 공통모드 간섭신호는 그라운드에 대해 상대적으로 OCR의 LED 전위를 높이거나 낮추기는 하지만 다이오드에 흐르는 전류에 영향을 주지는 않기 때문에 광 트랜지스터로의 데이터 전송에 영향을 미치지 않는다. HTL 레벨 신호전송에 있어서는 제너레이터가 필요하다. 두 개의 케이블 터미네이트 저항은 다이오드를 통해 흐르는 전류를 제한하고 캐패시터와 함께 극히 높은 유해 신호에 대해 LPF(Low Pass Filter) 역할을 한다.

검출기는 통상 DC/DC 컨버터로부터 전원공급을 받는데 OCR을 사용하면 검출기와 수신부의 전자회로가 전기적으로 분리된다. 결과적으로 상호 간섭이 분포 캐패시턴스 수준으로 낮아진다.

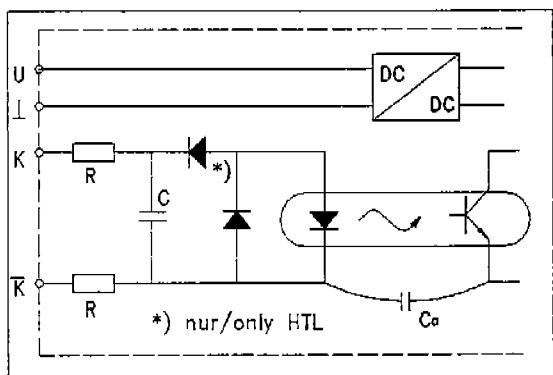


그림 7. OCR 전송

5. 최적 시스템 설계

일반적으로 속도검출기는 모터쪽에 직결시켜 장착하므로 제어판넬로부터의 거리가 수백 M에 이른다.

따라서 신호선의 길이가 길어짐에 따라 노이즈가 실려 들어올 가능성도 높다.

이러한 노이즈에 의하여 실제와 다른 속도값을 인식하거나, 정/역 회전의 신호가 잘못된 경우 등의 문제가 발생하고 그 결과 모터의 자속각

제어를 핵심으로 하는 AC 전동기 벡터제어를 구현하는데 심각한 영향을 끼칠수 있기 때문에 정확한 속도검출을 위해서 다음과 같은 사항을 고려하여 설계하였다.

- 설비에 적합한 검출기의 선정
- 내 노이즈 배선
- 적절한 필터회로
- 정확한 속도검출 알고리즘
- Low Power Loss
- Short Circuit Proof

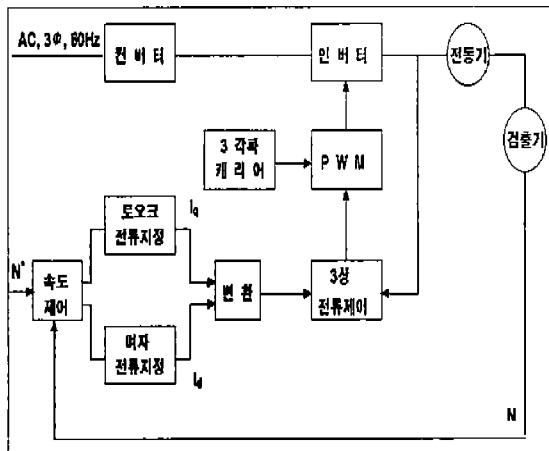


그림 8. 순시전류제어형 속도검출

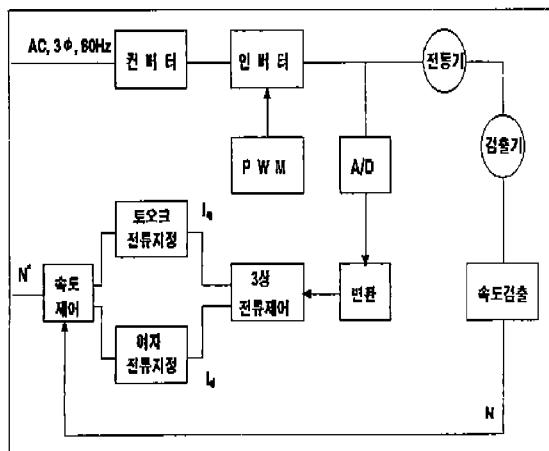


그림 9. 마이크로프로세서 제어 속도검출

속도검출을 위한 최적 시스템설계를 위하여 부하조건 및 현장상황에 따라서 구성되어야 하며 제어기에 의존하여 속도검출의 정확도를 확인할 수 있었던 종래의 폐단을 현장에서 측정 또는 조정할 수 있는 즉, 전동기에 부착되어 있는 검출기를 확인하면서 효율적인 시스템을 구성할 수 있다.

본 논문에서 제시하는 최적시스템은 그림10과

같이 전동기축을 기준으로 제어할 수 있는 시스템을 설계하였다.

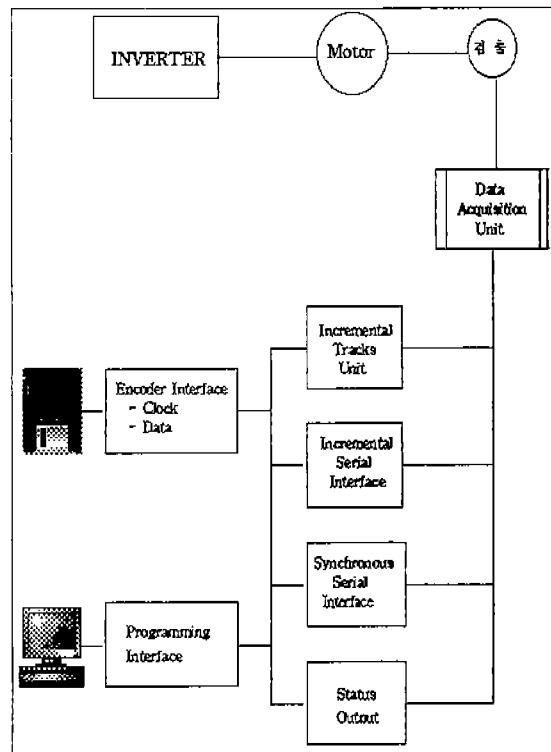


그림 10. 전동기축 기준 제어시스템

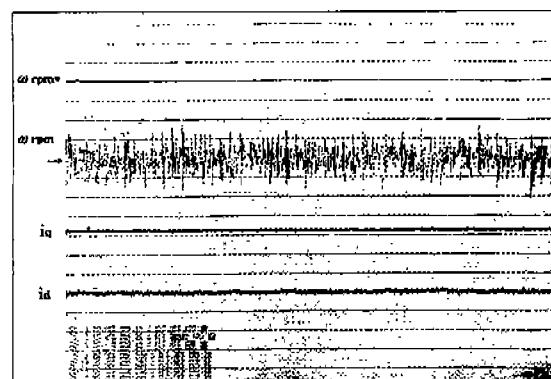


그림11. 정상상태 검출기 Ripple 파형

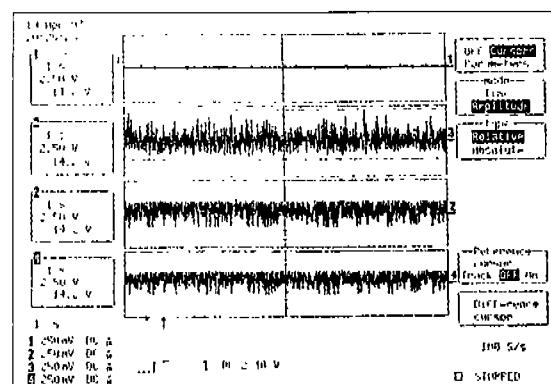


그림 12. 검출기 이상상태 파형

참 고 문 헌

- [01] B.K.Bose, Power Electronics and AC drivers, Prentic-Hall, 1987.
- [02] Speed-Sensorless Vector Control of an Induction Motor Using Adaptive Schemes, 1996.
- [03] AC Drive system, MELVEC-2000 Manual, MITSUBISHI, 1996.
- [04] Tough In Operation-Precise In Application, HUBNER, 1996.
- [05] Kubota, "DSP-Based Speed Adaptive Flux Observer of Induction Motor", IEEE. Trans. Ind. App., vol.29, No.2, Mar., pp.334~348, 1993.

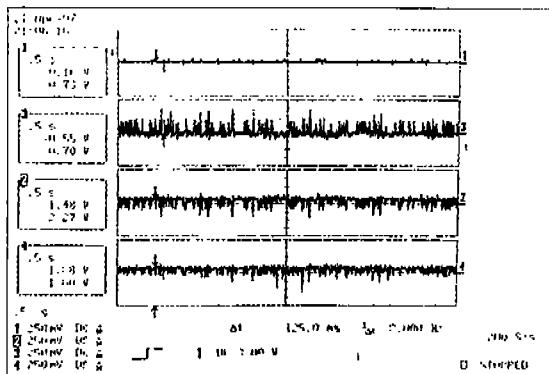


그림 13. 검출기 Ripple 과형 I

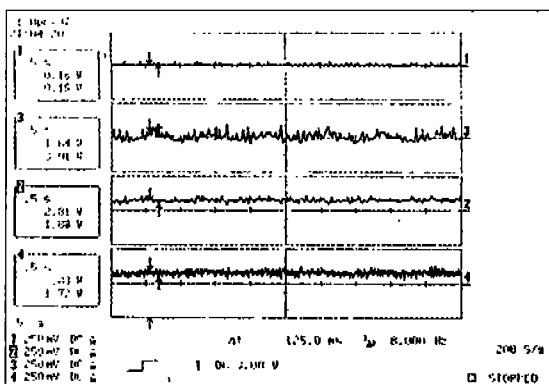


그림 14. 검출기 Ripple 과형 II

6. 결 론

유도전동기의 정밀한 속도검출 및 시스템 신뢰성을 확보하기 위해서 아날로그검출기와 디지털검출기를 결합한 새로운 형태의 검출기 특성이 요구된다.

따라서 아날로그 검출기는 당시의 속도신호를 측정하고 디지털 검출기는 정밀하게 위치를 측정할 수 있기 때문에 차세대 검출기로서 각광을 받을 수 있으며 본 논문에서 제안한 유도전동기 속도검출을 위한 최적 제어시스템은 열악한 환경의 공장에도 적합함을 확인하였으며, 검출기 리플율은 현장실험 데이터를 기준으로 최소 $\pm 0.5\%$ 이하가 되어야 속도정밀도를 보장할 수 있음을 알 수 있으며 앞으로 현대 제어이론이 현장 드라이브기술에 얼마나 접근할 수 있는지의 판단은 이론적인 알고리즘의 응용기술과 주변 제어기술의 지속적인 연구가 병행되어야 된다고 생각된다. 앞으로 시뮬레이션과 현장실험을 통하여 정밀도와 신뢰성을 더 높일 계획이다.