

論 文
35~10~4

유도전동기 단자전압, 전류에 의한 속도계산 및 속도제어에 관한 연구

A Study on the Speed Calculation and Speed Control Based on the Induction Motor Terminal Quantities

朴旻鎬* · 薛承基**
(Min-Ho Park · Seung-Ki Sul)

Abstract

The speed control system of induction motor without speed sensor is proposed in this paper. The speed of induction motor is calculated by motor terminal voltages and currents. The equations for speed calculation are derived and they are implemented on 16bit micro-processor Mc 68000. The software and hardware for the Mc 68000 is developed.

To prove the validity of the proposed method, the calculated speed is compared with the measured speed. The maximum speed error is nearly 1% in the overall range.

The proposed speed calculation method is applied to the Current Source Inverter(CSI) fed induction motor drive system. The experimental results show the good dynamics and the reasonable speed control accuracy.

1. 서 론

여러 산업현장에서 공정의 흐름에 따라 동력의 조절을 필요로 하는데 이는 주로 기계적인 구동축의 속도조절을 통하여 이루어져 왔다. 산업용 구동력으로써 전동기는 광범위하게 사용되어져왔고 그 속도조절에 관해서도 많은 연구가 있어왔다. 초기의 속도조절은 기계적인 수단에 의하여 이루어 졌으나 전력제어 기술의 발달로 인하여 전동기의 입력을 조절함으로써 전동기 속도를 조절하는 방법이 많은 산업현장에서 응용되고 있다.

유도전동기는 그 자체가 가지는 여러가지 장점—견고성, 무보수성, 소형, 경량, 저렴함—으로 인

하여 보편적으로 가장 많이 이용되는 전동기이다. 그러나 유도전동기는 입력주파수에 의해 속도가 거의 결정되어지는 정속도 특성을 갖는 전동기임으로 그 속도조정이 거의 불가능하였다.¹⁾ 최근의 전력용 반도체의 발전, 특히 on-off가 자유로운 전력용 트랜지스터, 혹은 GTO의 발전은 전력주파수의 조절을 용이하게 하였고, 이를 이용한 가변주파수방식의 유도전동기 속도조정시스템이 널리 보급되어 많은 산업체에서 활용되고 있다.²⁾

유도전동기의 속도는 입력주파수에 의해 대개 결정되어지고 기계적 부하의 증감에 따라 슬립(slip)만큼의 속도변동을 갖게 된다. 이러한 경우 전동기의 정격 슬립을 5%정도로 가정하면 4극유도전동기는 60Hz의 주파수에서 약 90r. p. m의 속도 변동을 갖는다. 대개의 경우 유도전동기 속도조정은 속도제한이 없는 단순한 입력주파수의 설정으로 이루어지나, 보다 정밀한 속도조정을 위해서는 속도정보를 제환할 필요가 있다. 이러한 속

*正 會 員 : 서울대 工大 電氣工學科 教授 · 工博

**正 會 員 : 서울대 大學院 電氣工學科 工博
接受日字 : 1986年 4月 4日

도정보는 전동기의 축에 연결된 속도측정장치를 통하여 이루어진다.

일반적인 속도측정장치는 전동기축과의 기계적인 연결을 필요로 함으로 기존에 설치된 전동기에는 때때로 부착이 곤란한 경우가 있고, 아날로그(Analog) 방식의 타코제너레이터(Tacho generator)는 주위 환경변화에 대한 오차와 신호전달상의 외부잡음에 대한 오차를 수반하게된다. 또한 전동기와 주파수제어장치(inverter)의 거리가 떨어져 있을 경우 전동기에서 측정된 속도를 제어장치에 까지 전달시키는데 여러문제가 생길 수 있다.

전동기의 속도를 기계적 방법에 의하지 않고 전동기의 입력전압, 전류등을 측정함으로써 속도를 계산하려는 연구는 많은 사람들의 관심을 끌어들였다. 이와 같은 시도는 주로 아날로그 전자회로를 이용하여 전동기의 전달함수를 계산하여 속도정보를 얻는 방법이다.⁴⁾⁵⁾ 또한 전동기 구동시에 전압에 나타나는 고조파 성분을 분석하여 전동기속도를 측정하는 연구도 발표된 바 있다.⁶⁾

최근의 마이크로세서의 발전은 눈부신 바 있어 전동기의 입력을 측정함으로써 전동기의 기계적인 속도를 실시간으로 계산할 수 있게 되었다.본 연구에서는 유도전동기의 단자전압, 전류를 측정하고 이를 이용하여 유도전동기의 슬립을 계산하는 수식을 제시하고 이를 마이크로 프로세서를 이용하여 실현시킴으로써 종래의 아날로그 방식의 계산이 가지는 여러가지 단점 - 주위 환경변화에 다른 오차, 외부잡음에의 취약성, 전동기 상수값의 설정의 불편함-을 해결하고 전 계산과정을 마이크로 프로세서의 소프트웨어(software)로써 처리함으로써 회로가 간단해지고 전동기의 크기에 관계 없이 간단히 적용할 수 있게 되어 강한 실용성을 갖게 되었다.

2. 속도계산의 원리

유도전동기를 대칭기계로 가정하면, 임의의 d-q 축에 대하여 다음과 같은 식이 성립한다.⁷⁾

$$\begin{aligned} V_{qs} &= R_s \cdot I_{qs} + P \lambda_{qs} + (P\theta) \cdot \lambda_{as} \\ V_{as} &= R_s \cdot I_{as} + p \lambda_{as} - (p\theta) \cdot \lambda_{qs} \\ V_{qr} &= R_r \cdot I_{qr} + p \lambda_{qr} + (p\beta) \cdot \lambda_{ar} \\ V_{ar} &= R_r \cdot I_{ar} + p \lambda_{ar} - (p\beta) \cdot \lambda_{qr} \end{aligned} \quad (1)$$

여기서 점차 d, q는 각각 d-axis, q-axis, s, r는 각각 고정자(stator), 회전자(rotor)를 나타내고 R_s 는 고정자 권선저항, R_r 는 회전자 등가저항, λ

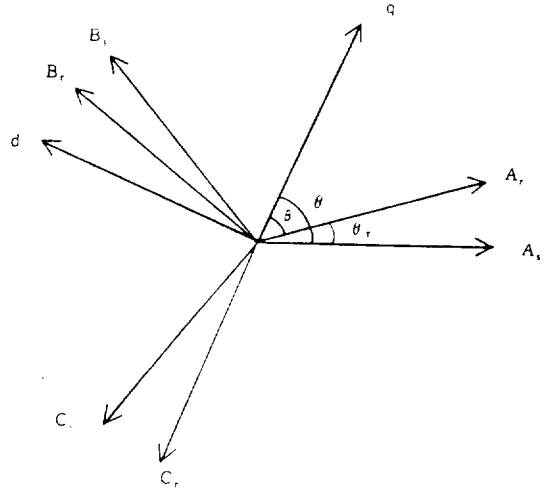


그림1. 임의의 d-q축

Fig. 1. Arbitrary reference frame.

는 쇄교자속(flux linkage), θ 와 β 는 그림1에 표시된 바와 같이 q축과 고정자 A 상축과의 각, 회전자 A 상축과의 각이다. p는 미분연산자(differential operator)로 $\frac{d}{dt}$ 이다.

농형유도전동기의 경우 $V_{qr}, V_{ar}=0$ 이 되고 d축을 고정자 A 상축에 일치시키면 $\theta=90^\circ$ 가 되므로 식(1)은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} V_{qs} &= R_s \cdot I_{as} + p \lambda_{qs} \\ V_{as} &= R_s \cdot I_{as} + p \lambda_{as} \\ p \lambda_{qr} &= +\omega_m \cdot \lambda_{qr} - R_r \cdot I_{qr} \\ p \lambda_{ar} &= -\omega_m \cdot \lambda_{ar} - R_r \cdot I_{ar} \end{aligned} \quad (2)$$

여기서 ω_m 은 회전자A상축과 고정자 A 상축과의 각을 시간에 대해 미분한 것으로 전동기의 기계적 각속도이다. 즉 $\omega_m = -p\beta$ 이다.

그림2에 표시된 바와 같이 회전자의 자속 λ_2 와 d축과의 각을 γ 라 두면

$$\begin{aligned} \lambda_{qr} &= |\lambda_2| \cdot \sin \gamma \\ \lambda_{ar} &= -|\lambda_2| \cdot \cos \gamma \end{aligned} \quad (3)$$

가 되고 λ_2 는 고정자권선의 회전자계와 일치함으로 γ 의 시간에 대한 미분치는 고정자에 인가되는 전원의 각속도, ω_1 이다.

$$\text{즉 } \frac{d\gamma}{dt} = \omega_1 \text{이다.}$$

q축을 고정자의 A상축에 일치시키고 A, B, C 상의 전압, 전류가 대칭 3상이라고 가정하면, $V_{as}, V_{qs}, I_{as}, I_{qs}$ 는 아래와 같이 상전압, 상전류로 표시

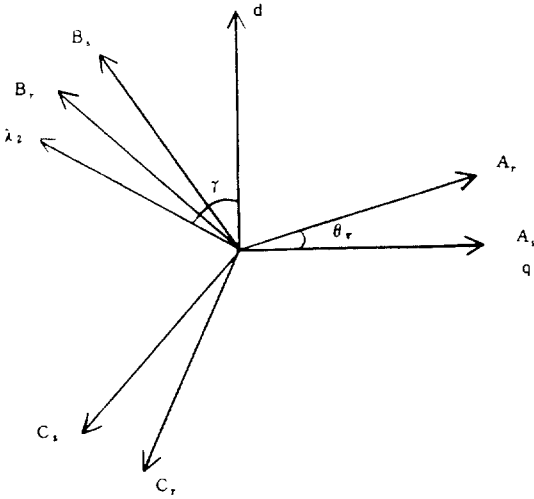


그림2. 고정자에 일치된 d-q축
Fig. 2. Stator fixed reference frame.

할 수 있다.

$$V_{ds} = V_{As}$$

$$V_{qs} = \frac{1}{\sqrt{3}}V_{As} + \frac{2}{\sqrt{3}}V_{Bs}$$

$$I_{ds} = \frac{3}{2}I_{As}$$

$$I_{qs} = \frac{\sqrt{3}}{2}I_{As} + \sqrt{3}I_{Bs}$$

식(2)에서 회전자 전류는

$$I_{ar} = \frac{1}{R_r} \cdot (-p\lambda_{dr} - \omega_m \cdot \lambda_{qr})$$

$$I_{qr} = \frac{1}{R_r} \cdot (-p\lambda_{qr} + \omega_m \cdot \lambda_{dr}) \quad (5)$$

로 표시된다.

전동기의 발생 회전력(Torque)은

$$T = \frac{P}{2} \cdot (\lambda_{qr} \cdot I_{dr} - \lambda_{dr} \cdot I_{qr}) \quad (6)$$

이 되고 여기서 P는 전동기의 극(pole) 수이다. 식(5)를 식(6)에 대입하면 회전력은

$$T = \left(\frac{P}{2}\right) / R_r \cdot \{ \omega_2 \cdot (\lambda_{qr}^2 + \lambda_{dr}^2) - \omega_1 \cdot (\lambda_{qr}^2 + \lambda_{dr}^2) + p\lambda_{dr} \cdot \lambda_{qr} - \lambda_{dr} \cdot p\lambda_{qr} \} \quad (7)$$

이고

여기서 ω_2 는 슬립 각속도이다. 즉

$$\omega_2 = \omega_1 - \omega_m \text{이다.}$$

식(3)에서 회전자 쇄교자속의 크기, $|\lambda_s|$ 가 서서히 변한다고 가정하면

$$\frac{d|\lambda_s|}{dt} \approx 0 \text{이 되므로 식(7)에 식(3)을 미분하여}$$

대입하면

$$T \approx \left(\frac{P}{2}\right) / R_r \cdot \omega_2 \cdot (\lambda_{qr}^2 + \lambda_{dr}^2) \quad (8)$$

이 된다.

쇄교자속은 각 권선의 인덕턴스와 흐르는 전류에 의해 아래식과 같이 표시된다.

$$\begin{bmatrix} \lambda_{qs} \\ \lambda_{qr} \\ \lambda_{ds} \\ \lambda_{dr} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_{ss} & L_{sr} & 0 & 0 \\ L_{sr} & L_{rr} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & L_{ss} & L_{sr} \\ 0 & 0 & L_{sr} & L_{rr} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{qs} \\ I_{qr} \\ I_{ds} \\ I_{dr} \end{bmatrix} \quad (9)$$

여기서 L_{ss}, L_{rr} 는 각각 고정자, 회전자의 자체 인덕턴스(self inductance)이고 L_{sr} 은 고정자와 회전자간의 상호 인덕턴스(Mutual inductance)이다. 식(9)에서 λ_{qs} 와 λ_{ds} 를 구하여 식(6)에 대입하면

$$T = \left(\frac{L_{sr}}{L_{rr}}\right) \cdot \left(\frac{P}{2}\right) \cdot (-I_{ds} \cdot \lambda_{qr} + I_{qs} \cdot \lambda_{dr}) \quad (10)$$

으로 표시된다.

식(10)을 식(8)에 대입하고 ω_2 에 관하여 정리하면

$$\omega_2 = \left(\frac{L_{sr}}{L_{rr}}\right) \cdot R_r \cdot \{ (\lambda_{qr} \cdot I_{ds} - \lambda_{dr} \cdot I_{qs}) / (\lambda_{qr}^2 + \lambda_{dr}^2) \} \quad (11)$$

이 된다.

식(9)를 역변환하면

$$\begin{bmatrix} I_{qs} \\ I_{qr} \\ I_{ds} \\ I_{dr} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_{ss} & L_{sr} & 0 & 0 \\ L_{sr} & L_{rr} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & L_{ss} & L_{sr} \\ 0 & 0 & L_{sr} & L_{rr} \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} \lambda_{qs} \\ \lambda_{qr} \\ \lambda_{ds} \\ \lambda_{dr} \end{bmatrix} \quad (12)$$

가 된다. 식(12)의 양변을 시간에 대해 미분하여 pI_{qs}, pI_{ds} 를 구하면

$$pI_{qs} = \frac{L_{rr}}{L_{ss} \cdot L_{rr} - L_{sr}^2} p\lambda_{qs} - \frac{L_{sr}}{L_{ss} \cdot L_{rr} - L_{sr}^2} p\lambda_{qr} \quad (13)$$

$$pI_{ds} = \frac{L_{rr}}{L_{ss} \cdot L_{rr} - L_{sr}^2} p\lambda_{ds} - \frac{L_{sr}}{L_{ss} \cdot L_{rr} - L_{sr}^2} p\lambda_{dr}$$

이 된다.

식(13)의 $p\lambda_{qr}, p\lambda_{dr}$ 을 회전자의 역기전력 V'_{qr}, V'_{dr} 으로 각각 정의하고 식(12)를 이용하여 $p\lambda_{qs}$ 와 $p\lambda_{ds}$ 를 소거하면 $p\lambda_{qr}, p\lambda_{dr}$ 즉 V'_{qr}, V'_{dr} 은 아래와 같이 표시된다.

$$V'_{dr} = \frac{L_{rr}}{L_{sr}} \cdot \{ V_{ds} - R_s \cdot I_{ds} - pI_{ds} \cdot (L_{ss} \cdot L_{rr} - L_{sr}^2) / L_{rr} \}$$

$$V'_{qr} = \frac{L_{rr}}{L_{sr}} \cdot \{ V_{qs} - R_s \cdot I_{qs} - pI_{qs} \cdot (L_{ss} \cdot L_{rr} - L_{sr}^2) / L_{rr} \} \quad (14)$$

또한 식(3)을 시간에 대해 미분하여 얻은 식 즉 $p\lambda_{qr} \approx +\omega_1 \lambda_{dr}$, $p\lambda_{dr} \approx -\omega_1 \lambda_{qr}$ 을 이용하면

$$\begin{aligned} \lambda_{dr} &= +V'_{qr}/\omega_1 \\ \lambda_{qr} &= -V'_{dr}/\omega_1 \end{aligned} \quad (15)$$

를 얻는다. 식(15)를 식(11)에 대입하면

$$\frac{\omega_2}{\omega_1} = \left(\frac{L_{sr}}{L_{rr}} \right) \cdot R_r \cdot \{ (V'_{qr} \cdot I_{ds} + V'_{dr} \cdot I_{qs}) / (V_{qr}^2 + V_{dr}^2) \}$$

을 얻는다. 전동기의 회전속도는

$$\omega_m = \omega_1 \left(1 - \frac{\omega_2}{\omega_1} \right)$$

이므로 식(16)을 이용하여 전동기 회전속도를 계산할 수 있다.

전동기의 속도를 계산하는 과정에서 전동기의 발생 회전력은 식(10)에서

$$T = \left(\frac{L_{sr}}{L_{rr}} \right) \cdot \left(\frac{P}{2} \right) \cdot (I_{ds} \cdot V'_{dr} + I_{qs} \cdot V'_{qr}) / \omega_1 \quad (17)$$

과 같이 얻어질 수 있고 전동기의 입력전력은

$$P_{in} = I_{ds} V_{ds} + I_{qs} V_{qs} \quad (18)$$

로 주어진다.

이상과 같이 전동기의 회전속도를 구할 수 있고 부수적으로 전동기 회전력 입력전력등을 구할 수 있다.

3. 속도 측정 및 제어를 위한 Hardware 구성

전체적인 hardware는 그림 3에 나타나 있다. 4개의 8bit A/D Converter를 통하여 상전압 V_{AS} , V_{BS} , 상전류 I_{AS} , I_{BS} 를 측정한다. 식(4), (14), (16), (17), (18)을 실시간(real time) 계산하기 위하여 16bit 마이크로프로세서 M_c68000이 사용되었다. M_c68000의 clock 주파수는 8MHz이고 속도측정 및 제어용 프로그램은 4kword의 EPROM에 저장되었다.

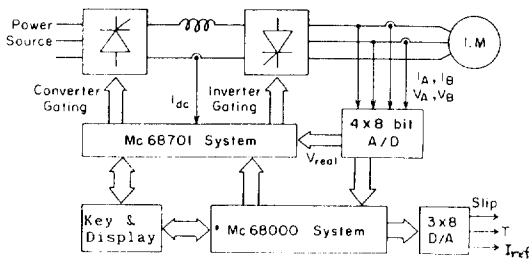


그림3. 전체적인 하드웨어개념도
Fig. 3. Hardware block diagram.

계산에 필요한 변수 및 마이크로프로세서의 STA CK memory로 2kword의 RAM이 사용되었고 계산된 결과를 아날로그 표시하기 위하여 3개의 8 bit D/A콘버터를 연결하였다. 전체적인 제어명령은 16개의 key를 통하여 입력되고 계산결과 및 운전상태는 8개의 14segment LED Display를 통하여 표시된다. 전압, 전류의 Sampling시간은 260 μ sec이고, 계산된 슬립, 토오크는 80번씩 평균하여, 그 평균치를 속도제어 및 O/A Converter로 변환하여 외부에 표시하는데 사용한다.

속도제어에의 적용은 전류형인버터 구동시스템에 적용하였는데, 속도제어방식은 전류형인버터제어시 통상 그 간편성으로 인하여 널리 쓰이는 slip-drive방식을 이용하였다.⁸⁾ 보편적인 slip-drive방식의 제어회로에서 전동기의 회전속도 ω_m 가 마이크로프로세서에 의한 계산값으로 대체되었다. 제어용 개념도(Control Block-diagram)는 그림 4에 나타나 있다. 싱글칩(single chip) 컴퓨터 M_c68701이 인버터, 콘버터의 게이팅(Gating) 신호발생을 위하여 사용되어지고, 전류형인버터의 전류제어도 싱글칩 컴퓨터내에서 이루어진다. M_c68000과 M_c68701사이에는 24bit의 Parallel Communication bus가 있는데, 이는 M_c68000에서 얻어진 인버터의 주파수 지령과 기준전류지령을 M_c68701에 전달하기 위해 사용된다.

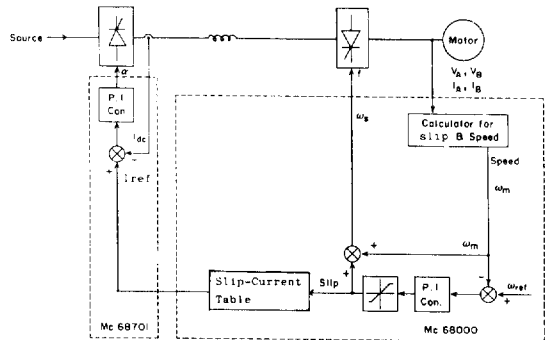


그림4. 제어용 개념도
Fig. 4. Control block diagram.

4. 속도 측정 및 제어를 위한 Software 구성

속도계산 및 속도제어의 software의 흐름도는 그림 5에 나타나 있다. 개개의 A/D 콘버터가 가

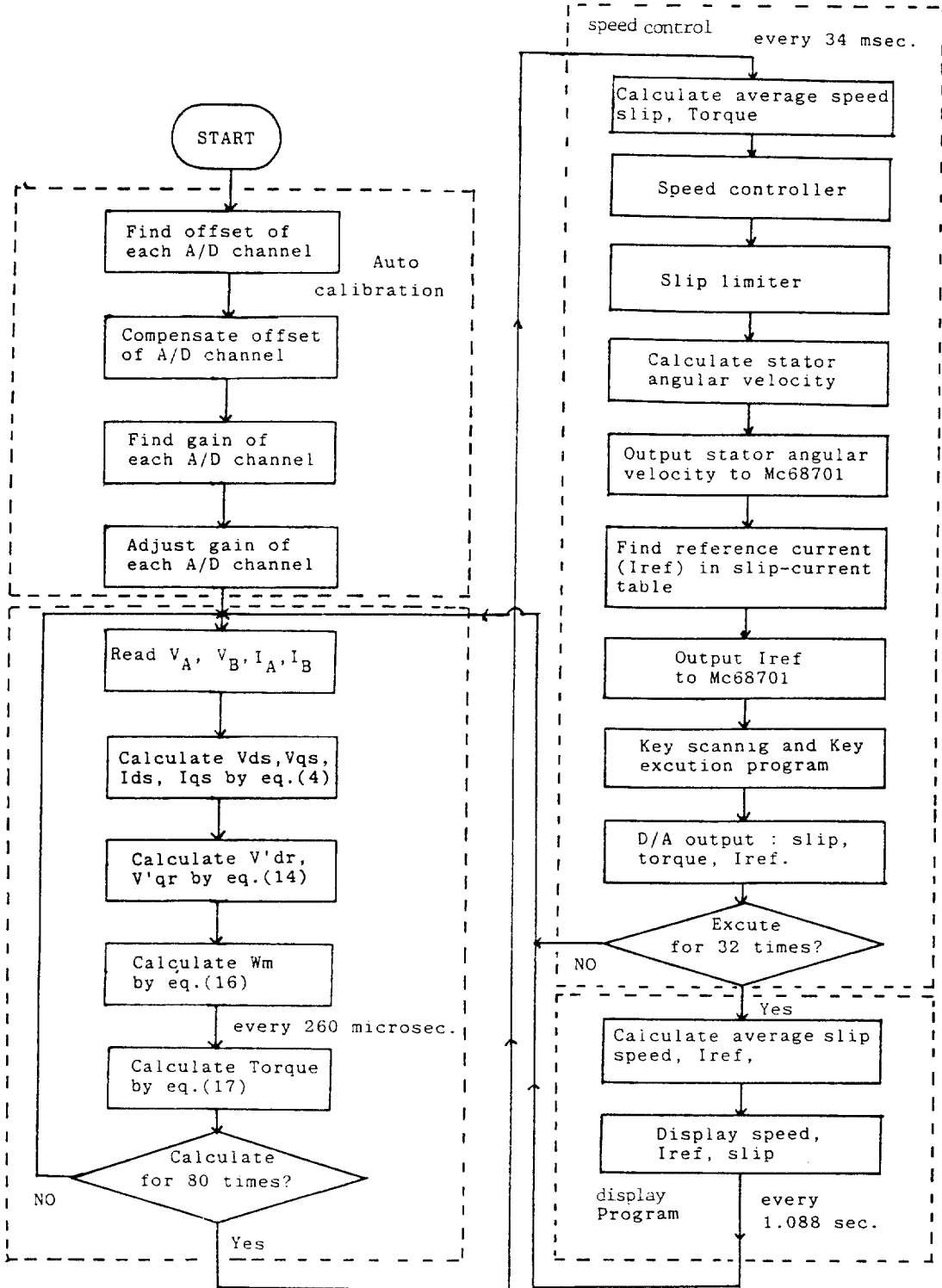


그림5. 소프트웨어 흐름도

Fig. 5. Software flow-chart.

지는 offset 과 증폭율의 차이를 조정하기 위하여 자동적으로 증폭율, offset 을 조정하는 프로그램을 개발하여 이용하였고, 전압과 전류는 8bit 로 받아들이지만 내부 연산은 16bit로 처리하여 Truncation error 를 줄였다. 식(14)의 미분은 two-point difference 방식을 이용하였다. 외부잡음의 효과를 상쇄하기 위하여 계산된 속도를 80번동안 평균하여 속도계산 및 D/A출력으로 표시하였다. Display 는 시각적인 효과를 고려하여 약 1초마다 한번씩 변경하였다. 내부의 속도제어기는 통상적인 디지털 P.I Controller의 Algorithm을 이용하였다.

5. 실험결과

속도계산의 정확성을 알기 위하여 전동기의 회전 속도를 디지털 속도계로 측정 한 값과 마이크로프로세서에 의해 계산된 값을 비교하였다. 측정된 슬립과 계산된 슬립은 그림 6에 나타나 있다. 속도 오차로 환산할 경우 인버터출력주파수 21Hz 에서 약 1% 오차가 있고 41Hz에서는 0.2%의 오차를 갖는다.

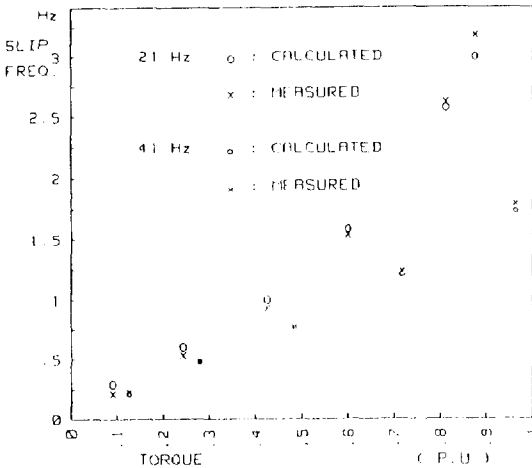


그림 6. 계산된 슬립과 측정된 슬립
Fig. 6. Calculated slip and measured slip.

속도제어기의 실험결과는 그림 7-9에 나타나 있다. 그림 7은 전동기의 부하 Torque의 증가시 속도응답을 보여준다. 전동기부하 Torque가 증가하면 속도는 약간 감소하였다가 다시 기준속도로 돌아간다. 전동기의 발생 Torque 역시 약간의 진동을 나타낸 후 증가된 부하 Torque에 해당하는 값으로 증가된다. 그림 8은 같은 경우에 있어 전동기

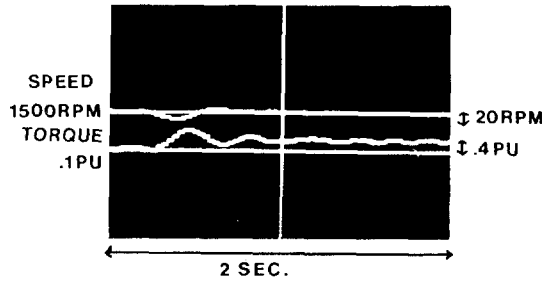


그림 7. 부하토크 증가시 속도와 전동기 발생토크 응답특성

Fig. 7. Speed and generated torque responses at load torque increase.

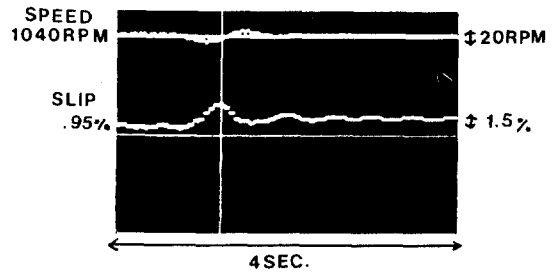


그림 8. 부하토크 증가시 속도와 슬립의 응답특성
Fig. 8. Speed and slip responses at load torque increase.

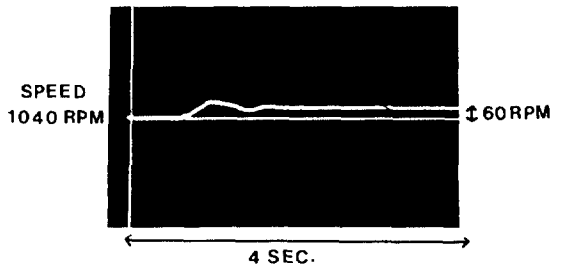


그림 9. 기준속도증가시 속도응답특성
Fig. 9. Speed response at reference speed change.

의 slip과 속도를 표시한다. 속도, Torque, 슬립은 3개의 D/A를 통하여 출력시켰다. 그림 8에서도 속도는 약간 감소하였다가 다시 기준속도로 돌아갔고 증가된 부하 Torque에 대응하기 위하여 슬립이 증가하였다. 그림 9는 기준속도변경시의 속도응답을 나타낸다. 전동기의 기준속도를 60r.p.m 증가시켰을때 속도는 약 1초후에 기준속도에 도달하였다. 전체적인 속도제어의 오차는 1% 이내였다.

6. 결 론

참 고 문 헌

제안된 속도계산방법은 실험결과에서 나타난 것처럼 1%이내의 오차를 갖고 있고, 이를 속도제어 계통에 적용한 결과 속도측정장치가 있는 system과 거의 유사한 응답특성을 얻었다. 속도계산의 정밀도를 증가시키기 위해서는 입력 A/D 콘버터의 Bit 수를 증가시키고, 내부의 연산속도를 빠르게하여 샘플링시간을 줄일 필요가 있다. 본 논문의 속도계산식의 과정에서 얻어지는 전동기의 발생토크, 전동기 입력전력 및 회전자 자속등에 관한 정보는 여타의 유도전동기 계통에도 폭넓게 이용될 수 있으리라 생각된다. 본 연구는 전동기 속도 측정장치가 힘든 여러 산업현장에서 전동기의 속도제어에 폭넓게 사용될 수 있으리라 생각된다.

〈부 록〉

1. 실험에 사용된 전동기 상수

4극 5Hp 농형 유도전동기.

$R_s=0.434 (\Omega)$, $R_r=0.356 (\Omega)$

$L_{ss}=0.05633 (H)$, $L_{rr}=0.05567 (H)$

$L_{sr}=0.0546 (H)$

2. 실험에 사용된 전류형인버터 제원

입력 : 220V, 60Hz, 출력 : 20~220V, 6~60Hz,

정격용량 : 5kVA, D, C link Inductance : 20mH,

Commutation Condenser : 7 μ F.

- 1) 박민호, 유도기기, 동명사, 1981. pp.313~320.
- 2) P. L. Alger, The nature of induction machines, 1965. pp.107~112.
- 3) B. K. Bose, Adjustable Speed AC Drive Systems, 1981. pp.1~21.
- 4) J. Holtz et al., "Electronic Analog Slip Calculator for Induction Motor Drives", IEEE Trans. Ind. Elec. Contr. Instrum., Vol. IECI-27, 1980.
- 5) R. Jotten et al., "Control Methods for Good Dynamic Performance Induction Motor Drives Based on Current and Voltage as Measured Quantities", IEEE Trans. Ind. Appl. Vol. IA-19, pp.356-363, May/June, 1983.
- 6) M. Ishida et al., "A New Slip Detector of an Induction Motor Utilizing Rotor Slot Harmonics", IEEE Ind. Appl. Vol. IA-19, pp. 575~582, May/June, 1984.
- 7) P. C. Krause et al., "Simulation of Symmetrical Induction Machinery", IEEE Trans. Power. Appr. Syst. Vol. PAS-84, pp. 1038~1053, 1965.
- 8) M. L. MacDonald et al., "Control Loop Study of Induction Motor Drives Using dq Model", IEEE IAS Annual Meeting Proceeding, pp. 897~903, 1978.