

인버터로 구동되는 誘導電動機의 정수 및 特性에 관한 研究

전내석*, 김종윤*, 오진석**, 김윤식**

* 한국해양대학교 대학원, ** 한국해양대학교

A Study on the Parameters and Characteristics of Induction Motor driven by Inverter

Nae-Suck Jeon*, Jong-Yun Kim*, Jin-Suck Oh**, Yoon-Sik Kim**

요 약

본 논문에서는 유도전동기의 정수 측정을 일반적인 상용전원에서 널리 이용되고 있는 T형 등가 회로를 이용하여 고정자 저항 실험, 무부하 및 구속 실험 등을 통하여 산정하였으며, 토크 특성 및 전류 측정은 스트레인 게이지(strain gage) 및 홀 센서(hall sensor)를 이용하였다.

1마력 3상농형 유도전동기를 실험에 이용하였으며 실험 측정값의 유효성을 입증하기 위하여 공장 설계값과 비교하였다.

ABSTRACT

This paper presents a method for the equivalent-circuit parameters and torque characteristics calculation of squirrel-cage induction motors. The measurement of motor parameters were calculated by the stator resistance test, the blocked rotor test and no load test through T type equivalent-circuit method. Especially, this paper describes the test results obtained by using hall sensor and strain gage for the current and the torque characteristics of induction motors.

1[HP], three-phase squirrel cage induction motor has been used during the test and the parameters are compared with those obtained by the maker parameters of simulation results and experiment.

I. 서 론

최근 에너지 절약과 공장 자동화를 추진함에 있어서 전동기의 가변속은 필수 불가결하게 되었고 교류가변속장치인 인버터는 상용전원의 전압과 주파수를 가변하여 공급함으로써 전동기의 속도를 쉽게 변화시킬 수 있다.

인버터에 의해 구동되는 농형 유도전동기는 가혹한 운전조건에서의 보수 경감, 에너지 절약 및 고효율화의 요구에 부합되어 산업체에서 널리 사용되고 있다.

가변속 전동기에 적합한 농형 유도전동기의 특성을 파악하기 위해 본 논문에서는 유도전동기의 기동 및 정상운전상태에서의 제반 정수들을 직접 측정하여 그 결과를 고찰하였다. 그리고, 유도전동기의 등가회로에서의 특성해석과 실제 측정에서의 특성 등을 비교하여 유도전동기를 이해하는데 본 논문의 초점을 두었다. 유도전동기의 정수

측정은 일반적인 상용전원에서 널리 이용되고 있는 T형 등가회로를 이용하여 고정자 저항 실험, 무부하 및 구속 실험 등을 통하여 산정하였다. 그리고 무부하 실험에서는 각종 손실을, 감속 실험에서는 관성 모멘트 및 점성 마찰계수를 산정하는 방법을 제시하였다. 부하변동에 대한 특성을 측정하기 위해 플라이휠($J=0.044[\text{Kg} \cdot \text{m}^2]$)을 이용하였고 토크 특성 및 전류 측정은 스트레인 게이지(strain gage) 및 홀 센서(hall sensor)를 이용한 전류검출회로를 이용하였다.

II. 이론적 고찰

유도전동기 회전자에 전해진 전력은

$$P_d = I_r^2 R_r \left(\frac{1-s}{s} \right) = \omega_m T \quad (1\text{相當}) \quad (2-1)$$

전류 I_r 는

$$I_r = \frac{V_i}{\sqrt{[R_{eq} + R_r(\frac{1-s}{s})]^2 + X_{eq}^2}} \quad (2-2)$$

여기서, $R_{eq} = R_s + R_r$ 이므로

$$R_{eq} + R_r(\frac{1-s}{s}) = R_s + R_r + \frac{R_r}{s} - R_r = R_s + \frac{R_r}{s} \quad (2-3)$$

식 (2-1)에 I_r 를 대입하면 식 (2-4)가 되고

$$P_d = \frac{V_i^2 R_r (1-s)}{s [(R_s + \frac{R_r}{s})^2 + X_{eq}^2]} \quad (2-4)$$

그리고, 토크는 아래와 같이 구할 수 있다.

$$T = \frac{V_i^2 R_r}{s \omega_s [(R_s + \frac{R_r}{s})^2 + X_{eq}^2]} \quad (2-5)$$

여기서, V_i 가 상전압이면 토크는 한 상당 토크이고 V_i 가 선간전압이면 3상에 해당하는 토크가 된다. 본 논문에서는 환상결선으로 하였기 때문에 후자에 해당한다.

무부하시(s=0)

$$\frac{R_r}{s} \gg R_s \quad (2-6)$$

$$(\frac{R_r}{s})^2 \gg X_{eq}^2 \quad (2-7)$$

그래서, 토크는 식 (2-8)와 같이 간단하게 된다.

$$T \cong \frac{V_i^2 R_r}{s \omega_s (\frac{R_r}{s})^2} = \frac{V_i^2 s}{\omega_s R_r} \quad (2-8)$$

기동시(s=1)

기동시 슬립은 1에 가깝고 전동기 속도는 매우 작은 상태이므로 이 경우 리액턴스는 권선 저항보다 매우 크므로 아래와 같이 근사화 할 수 있다.

$$(R_s + \frac{R_r}{s})^2 \ll X_{eq}^2 \quad (2-9)$$

$$T_{start} = \frac{V_i^2 R_r}{\omega_s (R_{eq}^2 + X_{eq}^2)} \quad (2-10)$$

$$T \cong \frac{V_i^2 R_r}{s \omega_s X_{eq}^2} \quad (2-11)$$

III. 실험장치의 구성

3상 유도전동기에 전원을 공급하여 이에 대한 특성을 고찰하기 위한 실험장치의 구성은 그림 Fig. 1과 같이 3상 교류전압 조정기(슬라이 탁스), 인버터, 배선용 차단기, 전자개폐기, 유도전동기, 직류발전기, 제로크로싱 검출회로, 타이머 제어회로, 전류검출회로, 스트레인 게이지 등으로 구성되어 있다. 실험장치의 구성에 사용된 유도전동기, 직류발전기의 제원은 아래 표와 같다.

Table. 1 3 Phase induction motor

프레임 80	출력 1HP(0.75[KW])	제조사 효성중공업
주파수 60[Hz]	극수 4P	회전수 1690[rpm]
전류 36 / 21 [A]	전압 220 / 380 [V]	효율 72[%]
기동계급 M	절연계급 B	중량 15[kg]

Table. 2 Load machine(D.C Generator)

극수 4P	출력 1HP(0.75[KW])	제조사 (주)고산전기
전기자 180[V] / 6.0[A]		회전수 1750[rpm]
계 자 180[V] / 0.71[A]		절연계급 F

유도전동기의 1차측 전압을 제어하기 위하여 전원과 유도기의 고정자 사이에 4개의 단계를 거친 후 전자개폐기의 확실한 동작을 위해서 타이머 제어회로를 설계하였고, 유도기의 입력전류를 측정하기 위해 전류검출회로(hall sensor)를 이용하였으며, 부하 변동에 의한 전동기 특성 변화를 확인하기 위해 플라이휠을 부착하였다. 또한, 토크의 측정을 위해 스트레인 게이지를 연결하여 전동기 기동 순간 축(shaft)의 변화(변형)량을計測하였다.

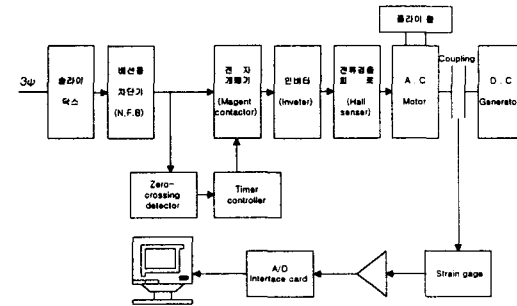


Fig. 1 Block diagram of measurement system

IV. 실험장치의 구성

1. 고정자 권선 저항 측정

직류 전류가 고정자 권선으로 흘러 들어가면 고정자에 자계가 형성되고 회전자 축을 돌리는 힘이 없다면 고정자의 회전자 회로에 대한 누설 자속은 시분변으로 일정하게 유지된다. 회전자에 유기되는 전압이 없고 전류가 흐르지 않으므로 토크도 발생하지 않는다. 또한, 회전자는 고정자에 대해 전기적 회로로서 효과를 나타내지 못하고 기자력이 발생되지 않으므로 직류 권선 저항 측정은 회전자 임피던스에 독립적으로 측정되어질 수 있다.

Fig. 2와 같이 회로를 구성하고 전압과 전류를 읽어 옴(ohm)법칙을 적용 식 (3-1)과 같이 계산한다.

$$R_{dc} = \frac{V_{dc}}{I_{dc}} = \frac{2R_s \cdot R_d}{R_s + 2R_d} = \frac{2R_s^2}{3R_d} = \frac{2}{3} R_d$$

$$\therefore R_d = \frac{3}{2} R_{dc} = R_s \quad (3-1)$$

여기서, 측정 저항값은 측정시 온도로 온도보상을 해 주어야 한다. 보상은 IEEE Std 112 규정에 따라 식 (3-2)와 같이 하였다^[4].

$$R_s = \frac{R_s(t_s + k)}{(t_r + k)} = \frac{3}{2} R_{dc} \cdot \frac{t_s + 234.5}{t_r + 234.5} \quad (3-2)$$

여기서,

t_s : 절연계급에 따른 규정값(B급 95°C)

t_r : 측정시 주위 온도(20°C)

k : 동(구리) 도전율(234.5)

R_s : 규정온도로 보상한 저항값

R_{dc} : 측정 저항

R_d : 환상 결선시 상당 저항

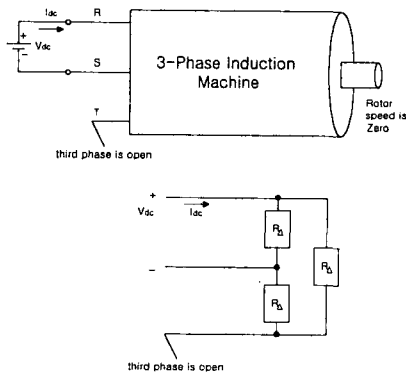


Fig. 2 Direct-current Measurement of stator winding resistance

2. 구속실험(Blocked rotor test)

구속 실험은 변압기의 단락(short circuit)실험에 해당하는 것으로 축이 고정되어 있기 때문에 회전자는 회전하지 못하므로 $\omega_m=0, s=1$ 인 상태이다.

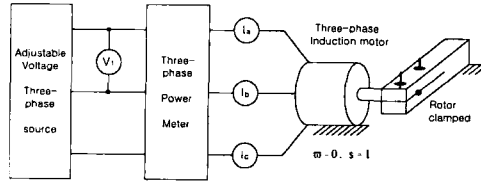


Fig. 3 Connection diagram for blocked rotor test

이 실험에서 정격 전압 및 주파수를 인가하면 정격 전류의 5~8배 정도의 전류가 흘러 자기포화 현상이 일어나고, 또한 정격 전류가 큰 기기에 부담이 되므로 이 실험시에는 전압을 0[V]에서 서서히 올려 정격 전압 53[V]를 인가한다. 실험 주파수는 고정자의 정격 주파수와 운전시의 회전자 주파수를 절충하여 정격 주파수보다 낮은 주파수(15[Hz])를 인가한다^[5](본 실험에서는 정격60[Hz]를 인가하였음). 이 실험에서 $s=1$ 이므로 고정자 및 회전자의 전류는 동일 주파수를 가진다. 그래서, 회전자와 고정자의 전류를 계산할 수 있는 것이다. 이 실험 회로에서 회전자의 고정 효과는 자화 어드미턴스 회로를 등가 회로에서 분리하는 효과를 나타내고 한 상에 걸리는 전압은 환상결선(Δ)에서 선간 및 상전압이 동일하고, 기기의 한 상당 임피던스의 크기는 식 (3-3)과 같이 나타내어진다.

$$|Z_{BR}| = \frac{\sqrt{3} V_{BR}}{I_{BR}} \quad (3-3)$$

여기서, I_{BR} 은 3상 평균전류이며 거의 정격전류와 같고, $s=1$ 이므로 $R_r/s = R_r$ 이고, 인가전압은 정격전압보다 매우 낮아서 여자 어드미턴스를 무시하고 나타낼 수 있다.

구속 실험시 합성저항 R_{BR} 은 식 (3-4)와 같다.

$$R_{BR} = \frac{P_{BR}}{3 \left(\frac{I_{BR}}{\sqrt{3}} \right)^2} = R_s + R_r \quad (3-4)$$

또는,

$$R_{BR} = |Z_{BR}| \cos \theta_{BR}, \cos \theta_{BR} = \frac{P_{BR}}{\sqrt{3} V_{BR} \cdot I_{BR}} \quad (3-5)$$

R_s 는 고정자 권선 저항 실험에서 구했기 때문에

$$R_r = R_{BR} - R_s = \frac{P_{BR}}{3 \left(\frac{I_{BR}}{\sqrt{3}} \right)^2} - \frac{3 V_{dc}}{2 I_{dc}} \quad (3-6)$$

위 식 (3-5)(3-6)에 의해 R_r 과 $\cos \theta$ 를 계산하면 R_r 은 7.54[Ω]이고 $\cos \theta$ 는 0.659이다.

$$X_{BR} = |Z_{BR}| \cdot \sin \theta = \sqrt{Z_{BR}^2 - R_{BR}^2} \\ = \sqrt{\left(\frac{\sqrt{3} V_{BR}}{I_{BR}}\right)^2 - \left(\frac{P_{BR}}{3\left(\frac{I_{BR}}{\sqrt{3}}\right)^2}\right)^2} \quad (3-7)$$

농형 유도전동기에서는 X_{BR} 의 얼마가 X_s 이고 X_r 인지 알 수 있는 방법은 없다. 그래서, 미국 전기 제품 제조업자협회 표준규격(NEMA : National Electrical Manufacturers Association)에서 권고하고 있는 Table. 3으로 분할하였다^[2].

Table. 3 NEMA 권고 리액턴스 분할표(60[Hz])

Rotor	X_s and X_r as fractions of X_{BR}
Wound	$X_s = X_r = 0.5X_{BR}$
Design A	$X_s = X_r = 0.5X_{BR}$
Design B	$X_s = 0.4X_{BR}, X_r = 0.6X_{BR}$
Design C	$X_s = 0.3X_{BR}, X_r = 0.7X_{BR}$
Design D	$X_s = X_r = 0.5X_{BR}$

식 (3-7)에서 $X_{BR}=19.89$ [Ω]이고, 실험에 사용한 모터는 일반 표준 모터로 NEMA 분류에서 B급 이므로 Design B의 분배비율을 적용하여 X_s, X_r 를 구하면 Table. 4와 같다.

Table. 4 누설 리액턴스 측정값

X_s (stator leakage reactance)	X_r (rotor leakage reactance)
7.956[Ω]	11.934[Ω]

구속 실험시 실험 주파수를 내리는 이유는 운전 상태하에서 고정자 주파수가 60[Hz]라면 회전자 주파수는 아주 작은 값이고, $s=1$ 일 때 고정자 주파수는 인가 전압의 주파수와 동일하며, B급 및 C급 회전자에서는 R_r 가 주파수의 함수이기 때문에 실험 주파수가 중요한 요소이다^{[2],[4]}. 요즘의 대부분의 표준 모터는 B급이고 권선형(wound rotor) 모터는 R_r 의 변동률이 그다지 크지는 않다. 그래서, IEEE Std 112-1996에서는 실험 주파수를 정격 주파수의 25[%]로 권장하고 있다. 리액턴스가 주파수에 비례한다는 사실을 고려하여 정격 주파수에서의 누설 리액턴스를 구하여야 할 것이다. 그러나, 정격 출력이 20마력 보다 작은 전동기에서는 주파수의 영향을 무시할 수 있으며, 따라서 실험기의 구속 실험은 정격 주파수로서 직접 행할 수 있다. 또한, R_r 는 온도의 함수이기 때문에 측정시 주위 온도 및 회전자 온도를 고려해 보상을 하여야 한다^{[1],[2],[3]}.

3. 무부하 실험(No load test)

유도전동기의 무부하 실험은 변압기의 개방회로실험(open circuit test)과 비슷하며 이때 회전자에는 어떠한 기계적 부하도 걸지 않고 운전되며 고정자에는 정격전압이 공급된다.

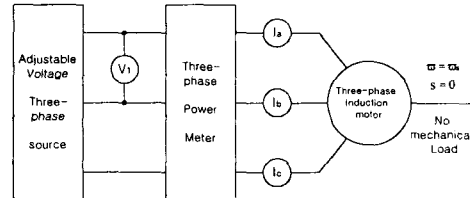


Fig. 4 Connection diagram for No load test

이 실험을 통하여 자화 콘덕턴스(G_m), 자화 세션턴스(B_m) 및 무부하 손실을 구할 수 있다. 평형 3상전압이 공급되는 유도기에서 무부하 실험을 할 때에는 부하를 걸지 않으므로 유도기의 속도는 거의 동기속도와 같고 슬립도 아주 작다($s=0$). 따라서, 회전자 전류는 없는 것으로 가정한다(회전자동손 무시^[7]). 가변 가능한 입력전압과 정격 주파수에서 고정자 전류와 전력을 기록한다. 무부하전력 P_{NL} 는 동손(고정자 저항손실) $I_{NL}^2 R_s$, 마찰손과 풍손($P_{frict} + P_{wind}$) 및 철손(P_{iron})의 총합과 같다. 철손은 고정자의 철손을 의미한다. 왜냐하면, 회전자가 동기속도와 거의 같은 속도로 회전할 때에는 회전자의 주파수는 아주 낮기 때문이다. 그러나, 실제로 회전자의 저항손실이 있다는 것에 주의해야 하지만 그 값은 아주 적다. 입력과 고정자 전류의 측정값을 입력전압에 대해서 그렸을 때 마찰손과 풍손을 정할 수가 있다. 이 목적을 위하여 동손($P_c = I_{NL}^2 R_s$)을 입력곡선에서 추출한다. 그리고, 얻어진 새 전력곡선($P_{NL} - P_c$)은 0[V]까지 외삽법(보간법)으로 그려진다^[3]. 그러므로, 풍손과 마찰손($P_{frict} + P_{wind}$)의 합계는 Fig. 5와 같이 구할 수 있다.

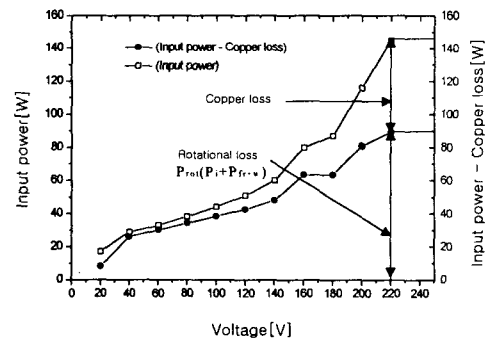


Fig. 5 Variation of input power and no load loss

4. 관성모멘트 측정

전동기의 무부하 운전시 전원을 순간적으로 끊어버리면 數秒가 지난후 정지하였다. 이때의 속도 변화 모양은 Fig. 6과 같이 기록되었다.

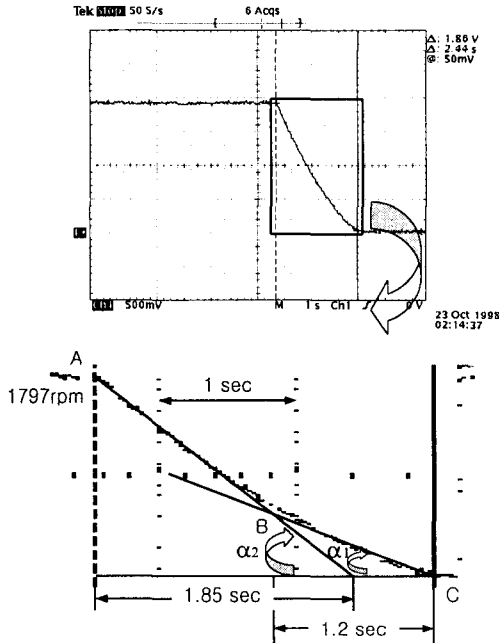


Fig. 6 Decelerating curve of motor speed

곡선을 AB와 BC 두 부분으로 나누어 생각한다. 처음 A에서 B까지는 속도가 빠르므로 점성마찰저항과 건성마찰 저항으로 감속되다가 속도가 감소함에 따라 점성마찰 저항은 소멸되고 속도와는 관계없는 건성마찰만 남게되어 일정한 減角加速度로 되는 부분이 BC이다.

전동기의 무부하 운전시 廻轉力의 평형식은

$$T - T_F = J \frac{d\omega}{dt} \quad (3-8)$$

무부하 정상상태에서는 $d\omega/dt=0$, $T = T_F$ 로 되어 있던중 電動機의 電源을 순간적으로 끊어버리면 식 (3-9)와 같이 성립한다.

$$-J \frac{d\omega}{dt} = -J\alpha_2 = T_F \quad (3-9)$$

잠시후 減速되어 점성 저항을 무시할 수 있는 속도(Fig. 6에서 BC 영역)에 도달하면

$$-J \frac{d\omega}{dt} = -J\alpha_1 = T_F \quad (3-10)$$

인 식이 성립하게 된다.

Fig. 6에서 減速曲線의 측정된 초기순간 減角加速度 α_2 는

$$\alpha_2 = \frac{\Delta\omega}{\Delta t} = \frac{\frac{2\pi}{60} \times 1800}{1.85} = -101.89 [\text{rad/sec}^2] \quad (3-11)$$

전동기를 220[V] 무부하 속도로 廻轉時 유효전력을 측정하니 145[W]였다. 이것을 [N.m]로 환산하면 약 145[N.m/sec]이다.

여기서, 토크 T는

$$T = \frac{P_{NL}}{\omega} = \frac{145}{\frac{2\pi}{60} \times 1800} = \frac{145}{60\pi} \left[\frac{\text{N.m/sec}}{1/\text{sec}} \right] \quad (3-12)$$

토크 T는 전동기 내부 마찰 토크 T_F 과 平衡이 된다.

$$\frac{145}{60\pi} = T_F = -J\alpha \quad (3-13)$$

따라서, 구하고자 하는 관성 모멘트 J는

$$J = \frac{1}{\alpha} \cdot \frac{145}{60\pi} = \frac{-1}{-101.89} \cdot \frac{145}{60\pi} = 0.0075 \quad [\text{Kg} \cdot \text{m}^2] \quad (3-14)$$

5. 점성마찰계수 측정

Fig. 6의 감속곡선을 AB(α_2)와 BC(α_1) 두 부분으로 나누어 생각할 때 전동기의 회전력에는 평형이 성립되고 있다.

$$T - T_F = J \frac{d\omega}{dt} \quad (3-15)$$

$$T = T_F = B\omega \quad (3-16)$$

$$J \frac{d\omega}{dt} = B(\omega_2 - \omega_1) \quad (3-17)$$

여기서,

ω_2 : 각속도 α_2 에서의 속도

ω_1 : 각속도 α_1 에서의 속도

따라서, 구하고자 하는 점성마찰계수 B는

$$B = \frac{J \frac{d\omega}{dt}}{\omega_2 - \omega_1} = \frac{J(\alpha_2 - \alpha_1)}{\omega_2 - \omega_1} = \frac{0.0075(101.89 - 52.36)}{188.5 - 62.8} \frac{[\text{Kg} \cdot \text{m}^2][\text{rad/sec}^2]}{[\text{rad/sec}]} = 0.0029 [\text{Kg} \cdot \text{m}^2/\text{sec}] \quad (3-18)$$

V. 실험결과 및 검토

농형 유도전동기의 권선 저항 측정, 구속 및 무부하 실험 결과 공장 설계값[105℃]과 실험 측정값[20℃]이 아주 유사함을 확인하였다. 설계값과 측정값의 차이는 측정시의 온도에서 유래한다.

Table. 5 공장 설계값 및 실험 측정값 비교

명칭	기호	공장설계값 [105℃]	실험측정값 [20℃]	단위
고정자권선저항	R_s	13.48	9.9	[Ω]
회전자권선저항	R_r	10.5	7.54	[Ω]
고정자누설저항	X_s	8.61	7.956	[Ω]
회전자누설저항	X_r	11.79	11.934	[Ω]
자화 콘덕턴스	G_m	0.00033	0.00184	[S]
자화 서셉턴스	B_m	0.00611	0.0106	[S]

일반적인 상용전원과 인버터에서 구동되는 유도전동기의 토오크 및 전류 특성을 고찰하고 파형을 오실로스코프로 관찰하였다.

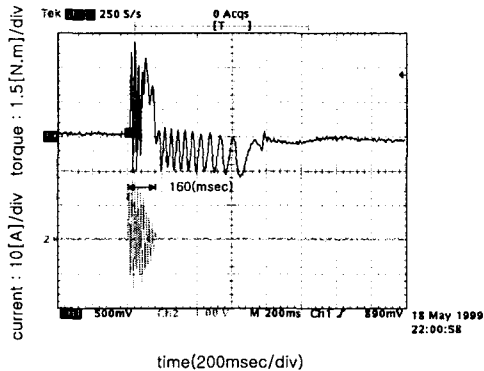


Fig. 7 Torque, current of the motor starting

Fig. 7은 상용전원을 인가하였을 때의 기동시 토르크 및 전류 파형이다. 토르크 측정은 스트레인 게이지(strain gage)의 출력전압을 오실로스코프 파형으로 나타낸 것으로 이 파형에는 전동기 토르크 변형과 탄성체의 진동 변형을 함께 포함하고 있다.

전류 측정은 전류검출회로(hall sensor)의 출력 전압을 측정한 것으로 기동시 최대 전류는 약 16~17[A]를 나타내고 있으며 정상상태에서는 전류가 급격히 감소하였다.

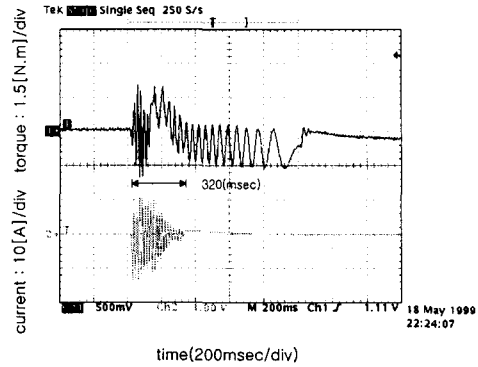


Fig. 8 Torque, current by inveter(60[Hz])

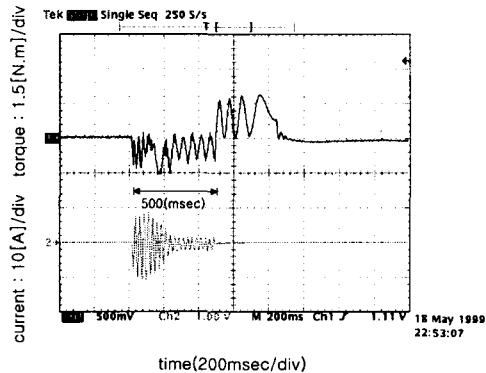


Fig. 9 Torque, current by inveter(30[Hz])

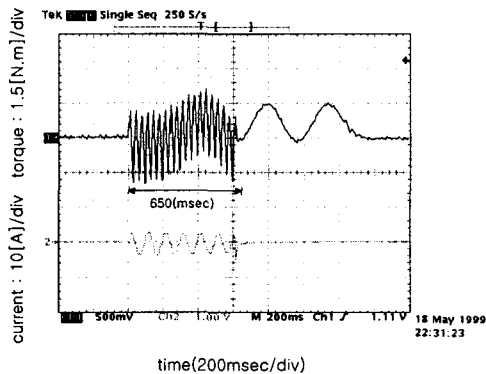


Fig. 10 Torque, current by inveter(10[Hz])

Fig. 8부터 10까지는 인버터에 의해 주파수를 가변하여 운전할 경우의 기동시 토르크 및 전류 파형이다. Fig. 7과 Fig. 8을 비교하면 Fig. 8과 같이 인버터를 사용했을 때의 기동시 토르크 및 전류의 전체적인 크기가 감소하고 상당히 높은 주파수 성분의 리플(맥동)이 발생함을 확인하였고 약 2배의 기동시간이 소요되었다. Fig. 9와 10에서 인버터 전원(운전주파수)의 감소에 따라 기동시

토크 및 전류의 맥동 주파수가 감소함을 알 수 있고 기동시간 또한 길어짐을 확인하였다. 여기서 초기 기동순간 부(-) 토크가 존재하는 것은 전동기의 힘보다 부하의 힘이 크기 때문이며 정상상태(1800[rpm]) 이후 부터는 정상적인 토크 모양을 보이고 있다.

가변속 구동설비인 인버터의 사용은 원하는 속도조절을 얻을 수 있지만 스위칭에 따른 전압 고조파는 손실의 증가를 가져오고 전동기 특성에도 나쁜 결과를 초래하여 전체적인 밴드 폭의 감소로 나타났다.

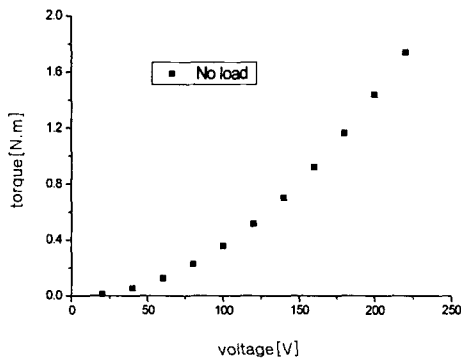


Fig. 11 Torque vs voltage curve

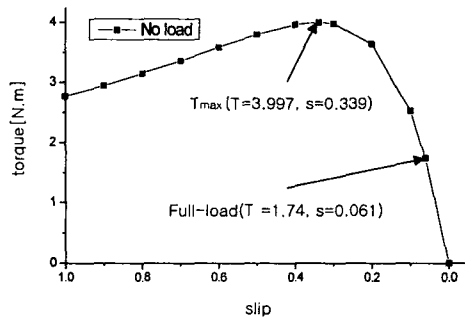


Fig. 12 Torque vs slip curve

Fig. 11은 상용전원에서 공급전압만 가변하여 얻은 토크 그래프로 식 (2-5)를 계산하여 나타낸 것이다. 그래프에 나타낸 바와 같이 이것은 전동기의 전압과 토크 사이에 비례관계가 성립하는 것을 알 수 있다. 자세히 설명하면 토크는 자속과 전류에 비례하나, 그 자속 자체는 전압이다. 따라서, 토크는 전압의 제곱에 비례한다.

Fig. 12는 전형적인 토크-슬립 곡선으로 식 (2-5)를 계산하여 나타낸 것이다. 최대 토크를 기준으로 슬립이 반비례에서 비례로 변함을 알 수 있고 무부하시 최대 토크(T_{max})는 3.997[N.m]이며, 이 때의 최대 슬립($s_{T_{max}}$)은 0.339이다.

VI. 결 론

본 논문에서는 권선 저항 측정, 구속 및 무부하 실험 결과로부터 농형유도전동기의 등가회로 정수를 산정 하였으며 공장 설계값의 결과와 比較 檢討한 결과 多少의 誤差는 있었으나 대체로 만족할 만한 결과를 얻었다. 즉, 고정밀도의 고가 장비 없이 간단한 측정장비 및 실험을 통하여도 정밀도가 높은 회로정수를 산정할 수 있었다. 또한, 유도전동기의 과도상태 특성을 통하여 시간영역에서의 토크 및 전류 변화를 확인할 수 있었으며 인버터에 의한 가변속 운전시 고조파에 의한 전력손실 및 높은 주파수 성분의 리플을 확인하였다. 따라서, 본 논문 결과는 농형 유도전동기의 기동특성 개선과 인버터용 전동기의 용도 및 용량에 따라 적합한 설계를 할 수 있는 좋은 자료가 될 것으로 사료되며 실험을 통해 본 논문에서 얻은 결과를 요약하면 다음과 같다.

- (1) 본 논문에서 제시한 권선 저항 측정, 구속 및 무부하 실험 기법으로 농형 유도전동기의 정수값을 측정한 결과 제시한 바와 같이 실용적인 측정 결과를 얻을 수 있었다.
- (2) 기동시 순시 토크의 측정을 탄성 커플링과 스트레인 게이지를 이용하여 시도하였으며, 기동시의 정상적인 토크의 변화를 파악하였다.
- (3) 감속곡선을 통하여 관성 모멘트(J) 및 점성 마찰계수(B)를 구할 수 있었고 측정 오차가 아주 적음을 확인하였다.
- (4) 정현파 전압원(상용전원) 기동에 비해 인버터 전원 사용시 약 2배의 기동시간이 소요되며 인버터의 출력 주파수가 낮을수록 기동시간이 증가함을 확인하였다.
- (5) 인버터 기동시 스위칭 작용에 의해 발생하는 고조파 성분의 영향으로 정현파 전압원보다 토크 및 전류 크기가 감소하고 상당히 높은 주파수 성분의 리플(맥동)이 발생하고, 출력 주파수가 낮을수록 감소함을 확인하였다.

가변속 전동기로 구동되는 유도전동기는 엄격한 환경하에서 사용되고, 설치조건에 제한이 있고, 효율이 높으면서, 동시에 저속영역에서 높은 토크, 광범위한 속도로 정출력 특성이 필요로 하는 등, 설계상(정수·토크 등)의 지속적인 연구가 필요하며 앞으로, 측정장비의 디지털화 및 고속화가 이루어지면 더욱더 정밀한 해석이 가능하리라 사료된다. 또한, 탄성 커플링의 구조 및 탄성계수 등에 대한 토크의 출력값 변화가 예상되므로 앞으로 기동 토크의 정확한 계측을 위한 연구가 요구된다.

참 고 문 헌

- [1] Paul C. Krause, *Analysys Of Electric Machinery*, McGraw-Hill Book Company, 1986.
- [2] S.A Nasar, *Handbook Of Electric Machines*, McGraw-Hill Book Company, 1987.
- [3] Peter Vas, *Parameter Estimation Condition Monitoring And Diagnosis Of Electrical Machines*, Oxford Science Publications, 1993.
- [4] George Mcpherson And Robert D.Laramore, *An Introduction To Electrical Machines And Transformers*, John Wiley And Sons, Inc. 1990.
- [5] IEEE Standard Test Procedure For Polyphase Induction Motors And Generators, 1996.
- [6] Paresh C. Sen, *Principles of Electric Machines and Power Electronics*, John Wiley And Sons, Inc, 1997.
- [7] Peter F. Ryff, *Electric Machiney*, Prentice Hall, 1994.
- [8] 박민호, “誘導機器”, 동명사, 1975
- [9] 沈東河, “Analysis of the Equivalent-Circuit Parameters of Induction Motors Using Finite Element Method” 서울대학교, 석사학위 논문, 1998.