

# 인버터로 구동되는 誘導電動機의 정수 및 特性에 관한 研究

전 내 석\* · 노 창 주\*\*

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

Nae-Seok Jeon · Chang-Joo Noh

### 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. It is essential to obtain the accurate parameters in the method because the operating characteristics of induction motors are determined by them.

This paper also presents a method for the motor no load loss and inertia coefficient  $J$  and viscous friction coefficient  $B$  by retardation test.

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.

### 1. 序 論

가변속 전동기에 적합한 농형 유도전동기의 특성을 파악하기 위해 본 연구에서는 유도전동기의 기동 및 정상운전상태에서의 제반 정수들을 직접 계측하여 그 결과를 고찰하였다. 그리고, 유도전동기의 등가회로에서의 특성해석과 실제 측정에서의 특성 등

\* 한국해양대학교 기관공학과 석사과정 전기제어전공

\*\* 한국해양대학교 기관공학과 교수

을 비교하여 유도전동기를 기본특성을 파악하는데 본 연구의 초점을 두었다.

유도전동기의 정수 측정은 일반적인 상용전원에서 널리 이용되고 있는 T형 등가회로를 이용하여 고정자 저항 실험, 무부하 및 구속 실험 등을 통하여 산정하였으며, 토오크 특성 및 전류 측정은 스트레인 게이지 및 홀 센서(hall sensor)를 이용하였다.

## 2. 實驗裝置의 構成

Fig. 1에 실험 장치 구성도를 도시하였다. 3상 농형 유도전동기의 1차측 전압을 제어하기 위하여 電源과 유도기의 고정자 사이에 4개의 단계를 거친 후 전자개폐기의 확실한 동작을 위해서 타이머 제어회로를 설계하였고, 유도기의 입력전류를 측정하기 위해 전류검출회로(hall sensor)를 이용하였으며, 토오크의 측정을 위해 스트레인 게이지를 연결하였다.

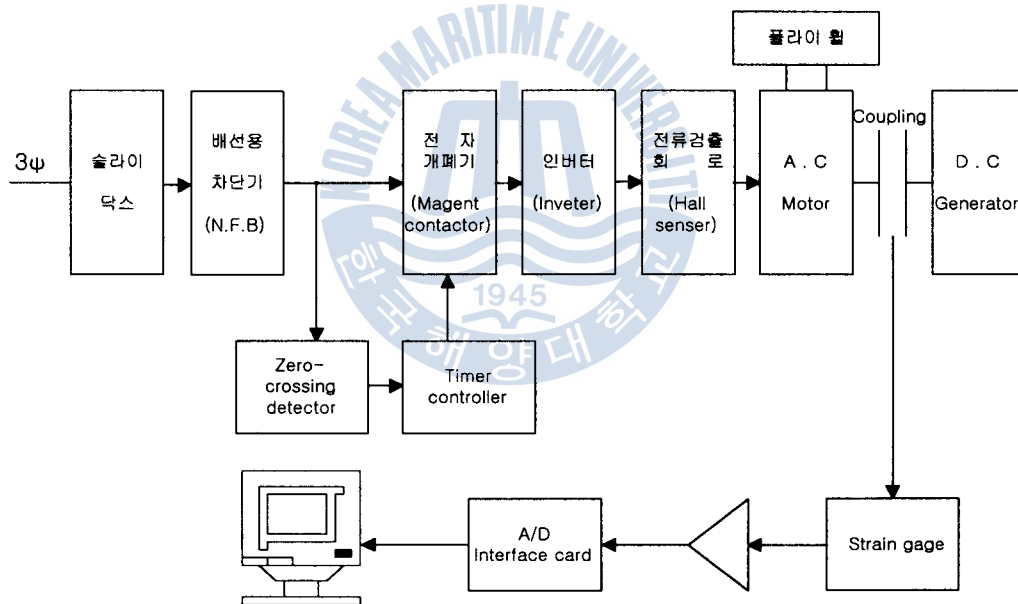


Fig. 1 실험장치 구성도

## 3. 實驗 및 考察

### 3.1 고정자 권선 저항 측정

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

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

$$\therefore R_{\Delta} = \frac{3}{2} R_{dc} = R_s \tag{3-1}$$

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

$$R_s = \frac{R_t(t_s + k)}{(t_t + k)} = \frac{3}{2} R_{dc} \cdot \frac{t_s + 234.5}{t_t + 234.5} \tag{3-2}$$

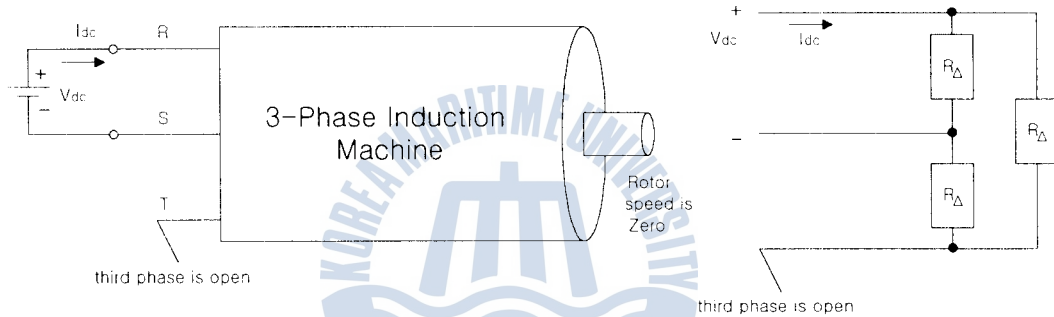


Fig. 2 고정자 권선 저항 측정 구성도

### 3.2 구속 실험(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.

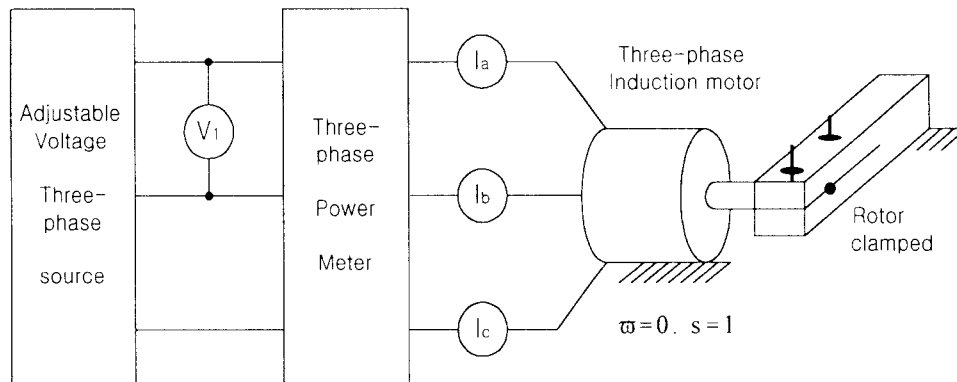


Fig. 3 구속 실험 결선도 ( $V_1$  : 전압계,  $I_{a,b,c}$  : 전류계)

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]을 인가한다. 이 실험에서  $s=1$ 이므로 고정자 및 회전자의 전류는 동일 주파수를 가진다. 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)와 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,

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

$R_s$ 는 고정자 권선 저항 실험에서 구했기 때문에

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

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.

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

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 Manufactures

Association)에서 권고하고 있는 Table. 1로 분할하였다<sup>[2]</sup>.

Table. 1 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	$X_s = X_r = 0.5X_{BR}$

### 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.

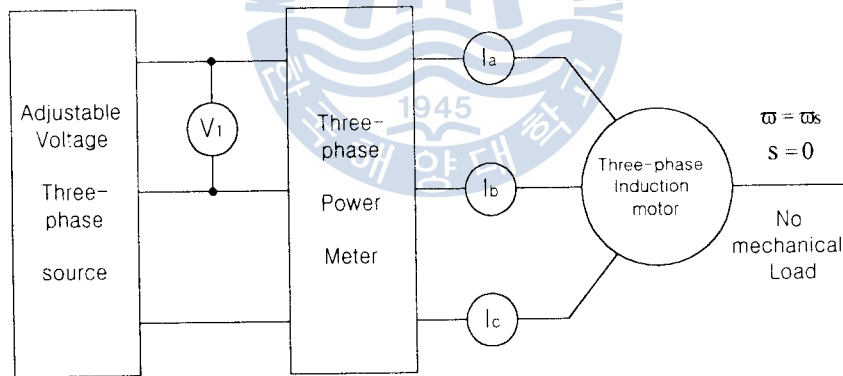


Fig. 4 무부하 실험 결선도 ( $V_1$  : 전압계,  $I_{a,b,c}$  : 전류계)

이 실험을 통하여 자화 컨덕턴스( $G_m$ ), 자화 서셉턴스( $B_m$ ) 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( $s \approx 0$ ). 따라서, 회전자 전류는 없는 것으로 가정한다(회전자동손 무시<sup>[6]</sup>). 무부하전력  $P_{NL}$ 는 동손(고정자의 저항손실)  $I_{NL}^2 R_s$ , 마찰손과 풍손( $P_{frict} + P_{wind}$ ) 및 철손( $P_{iron}$ )의 총합과 같다. 입력과 고정자 전류의 측정값을 입력전압에 대해서 그렸을 때에 마찰손과 풍손을 정

할 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<sup>[3]</sup>. 그러므로, 풍손과 마찰손( $P_{frict} + P_{wind}$ )의 합계는 Fig. 5와 같이 구할 수 있다.

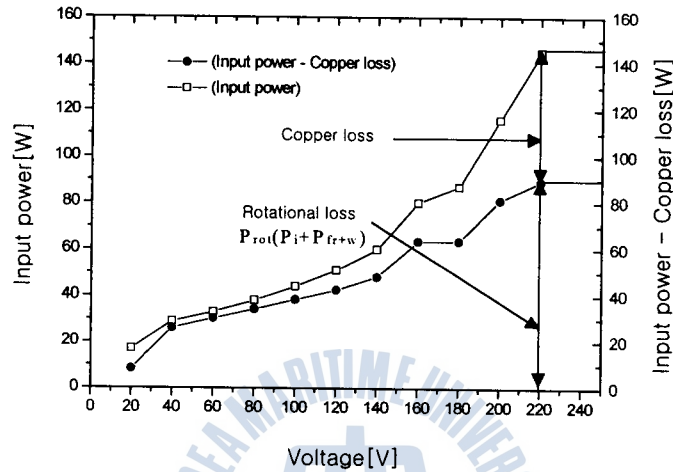


Fig. 5 무부하시 입력전력 및 손실

### 3.4 토오크 측정 실험

起動 토오크는 전동기가 회전을 시작할 때의 廻轉力으로 측정방법은 유도전동기와 직류발전기 커플링 사이에 게이지를 부착하여 스트레인 게이지 본체와 연결하여 전동기 기동 순간 축의 변화량을 計測하는 실험이다.

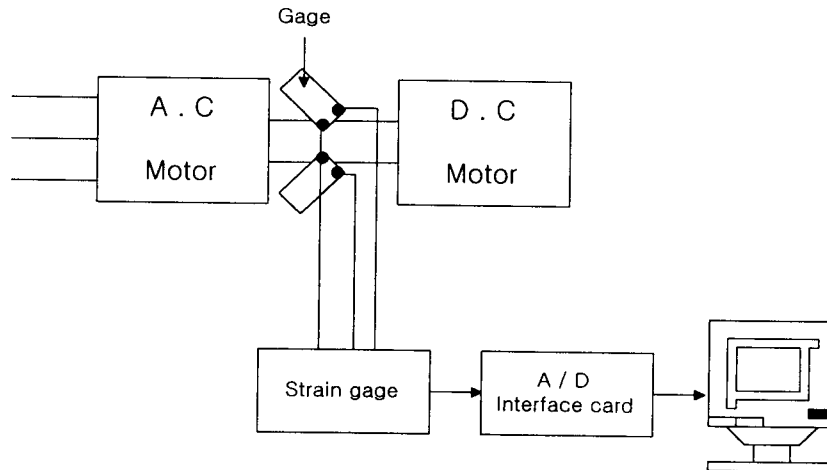


Fig. 6 토오크 측정 장치

### 3.5 관성 모멘트 및 점성 마찰계수 측정

電動機의 無負荷 運轉時 電源을 순간적으로 끊어버리면 數秒가 지난후 정지하였다. 이때의 速度變化 모양은 Fig. 7과 같이 기록되었다.

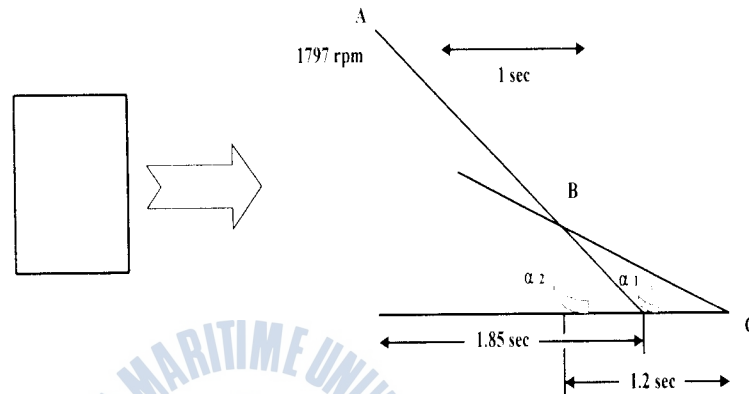


Fig. 7 감속 곡선

曲線을 AB와 BC 두 부분으로 나누어 생각한다. 처음 A에서 B까지는 速度가 빠르므로 점성 마찰저항과 건성마찰 저항으로 減速되다가 速度가 감소함에 따라 점성마찰 저항은 소멸되고 速度와는 관계없는 건성마찰만 남게되어 一定한 減角加速度로 되는 부분이 BC이다.

電動機의 無負荷 運轉時 廻轉力의 平衡式은

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

無負荷 定常狀態에서는  $d\omega/dt = 0$ ,  $T = T_F$ 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 速度(Fig. 7의 BC 영역)에 도달하면

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

인 식이 성립하게 된다.

Fig. 7에서 減速曲線의 測定된 초기순간 減角加速度  $\alpha_2$ 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] 無負荷 速度로 廻轉時 有効전력을 測定하니 145[W]였다. 이것을 [N.m]로 환산하면 약 145[N.m/sec]이다.

여기서, 토크  $T$ 는

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

토크  $T$ 는 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  $J$ 는

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

Fig. 7의 감속곡선을 AB( $\alpha_2$ )와 BC( $\alpha_1$ ) 두 부분으로 나누어 생각할 때 전동기의 회전력에는 평형이 성립되고 있다. 따라서, 점성 마찰계수를 다음과 같이 나타낼 수 있다.

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

$$J \frac{d\omega}{dt} = B(\omega_2 - \omega_1) \quad (3-16)$$

여기서,

$\omega_2$  : 角速度  $\alpha_2$ 에서의 속도

$\omega_1$  : 角速度  $\alpha_1$ 에서의 속도

따라서, 구하고자 하는 점성마찰계수  $B$ 는

$$B = \frac{J \frac{d\omega}{dt}}{\omega_2 - \omega_1} = \frac{J(\alpha_2 - \alpha_1)}{\omega_2 - \omega_1}$$



$$= \frac{0.0075(101.89 - 52.36)}{188.5 - 62.8} \frac{[Kg \cdot m^2][rad/sec^2]}{[rad/sec]}$$

$$= 0.0029[Kg \cdot m^2/sec] \tag{3-17}$$

### 4. 實驗結果 및 檢討

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. 2 공장 설계값 및 실험 측정값 비교

명 칭	기 호	공장설계값[105℃]	실험측정값[20℃]	단 위
고정자권선저항	$R_s$	13.48	9.9	[ $\Omega$ ]
회전자권선저항	$R_r$	10.5	7.54	[ $\Omega$ ]
고정자누설저항	$X_s$	8.61	7.956	[ $\Omega$ ]
회전자누설저항	$X_r$	11.79	11.934	[ $\Omega$ ]
자화 콘덕턴스	$G_m$	0.00033	0.00184	[ $\varnothing$ ]
자화 서셉턴스	$B_m$	0.00611	0.0106	[ $\varnothing$ ]

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

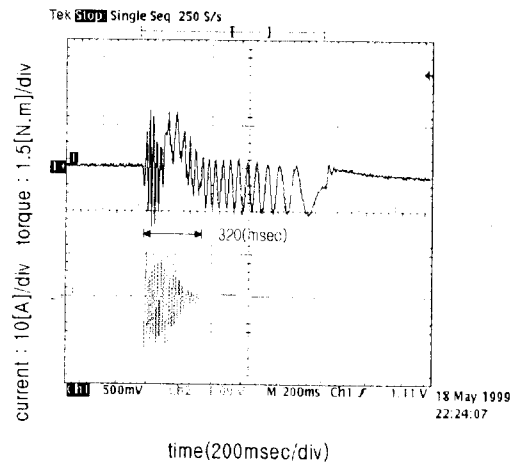
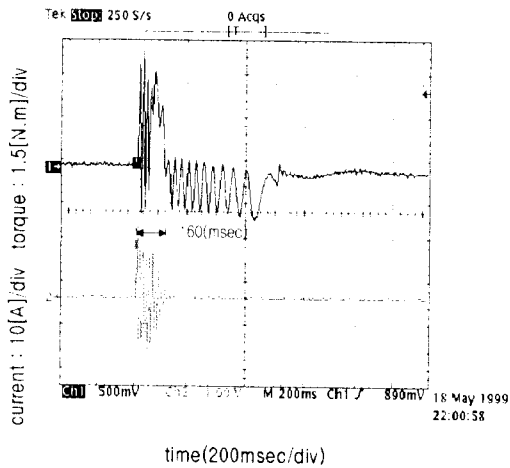


Fig. 8은 상용전원을 인가하였을때의 기동시 토오크 및 전류 파형이다. 토오크 측정 은 스트레인 게이지(strain gage)의 출력전압을 오실로스코프 파형으로 나타낸 것으로 이 파형에는 전동기 토오크 변형과 탄성체의 진동 변형을 함께 포함하고 있다. 전류 측정은 전류검출회로(hall sensor)의 출력전압을 측정한 것으로 기동시 최대 전류는 약 16~17[A]를 나타내고 있으며 정상상태에서는 전류가 급격히 감소하였다.



$$\begin{aligned}
 &= \frac{0.0075(101.89 - 52.36)}{188.5 - 62.8} \frac{[Kg \cdot m^2][rad/sec^2]}{[rad/sec]} \\
 &= 0.0029[Kg \cdot m^2/sec] \tag{3-17}
 \end{aligned}$$

### 4. 實驗結果 및 檢討

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. 2 공장 설계값 및 실험 측정값 비교

명 칭	기 호	공장설계값[105℃]	실험측정값[20℃]	단 위
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	[Ω]
자화 서셉턴스	$B_m$	0.00611	0.0106	[Ω]

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

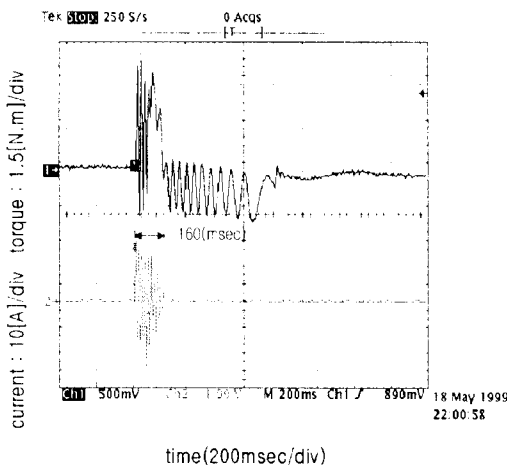


Fig. 8 기동시 토오크, 전류(220(V))

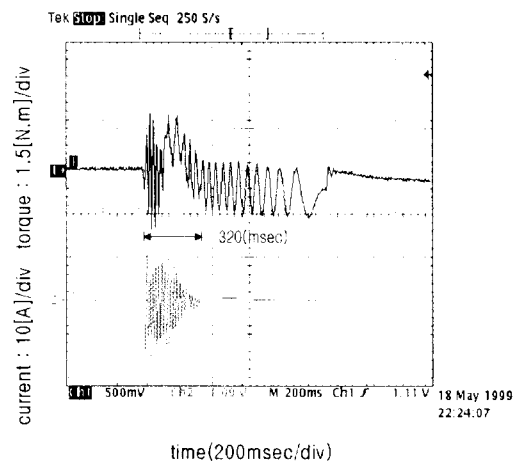


Fig. 9 인버터에 의한 토오크, 전류(60(Hz))

Fig. 8은 상용전원을 인가하였을때의 기동시 토오크 및 전류 파형이다. 토오크 측정 은 스트레인 게이지(strain gage)의 출력전압을 오실로스코프 파형으로 나타낸 것으로 이 파형에는 전동기 토오크 변형과 탄성체의 진동 변형을 함께 포함하고 있다. 전류 측정은 전류검출회로(hall sensor)의 출력전압을 측정한 것으로 기동시 최대 전류는 약 16~17[A]를 나타내고 있으며 정상상태에서는 전류가 급격히 감소하였다.

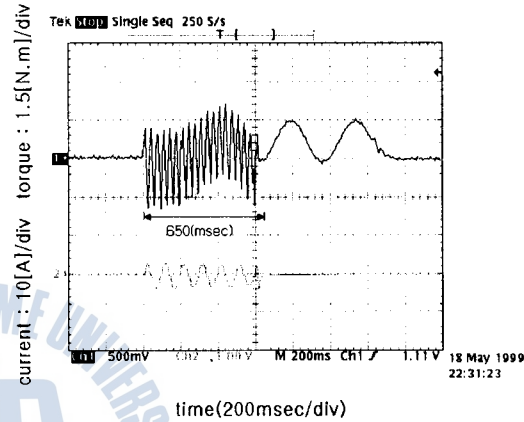
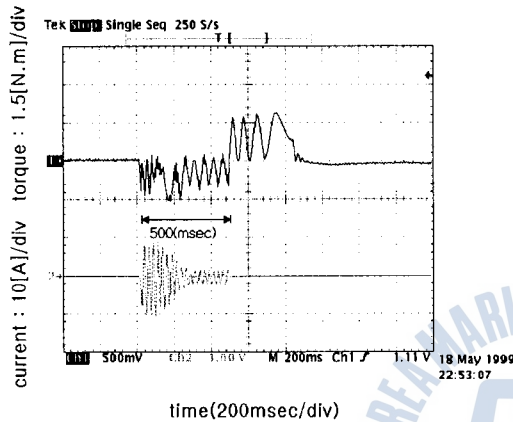


Fig. 10 인버터에 의한 토오크, 전류(30(Hz))      Fig. 11 인버터에 의한 토오크, 전류(10(Hz))

Fig. 9부터 11은 인버터에 의해 주파수를 가변하여 운전할 경우의 기동시 토오크 및 전류 파형이다. Fig. 8과 Fig. 9를 비교하면 Fig. 9와 같이 인버터를 사용했을때의 기동시 토오크 및 전류의 전체적인 크기가 감소하고 상당히 높은 주파수 성분의 리플(맥동)이 발생함을 확인하였고 약 2배의 기동시간이 소요되었다. Fig. 10과 11에서 인버터 전원(운전주파수)의 감소에 따라 기동시 토오크 및 전류의 맥동 주파수가 감소함을 알 수 있고 기동시간 또한 길어짐을 확인하였다. 여기서 초기 기동순간 부(-) 토오크가 존재하는 것은 전동기의 힘보다 부하의 힘이 크기 때문이며 정상상태(1800[rpm]) 이후 부터는 정상적인 토오크 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.

## 5. 結 論

본 연구에서 제시한 권선 저항 측정, 구속 및 무부하 실험 기법으로 농형 유도전동기의 정수값을 측정한 결과 제시한 바와 같이 실용적인 측정 결과를 얻을수 있었고,

기동시 순시 토오크의 측정을 탄성 커플링과 스트레인 게이지를 이용하여 시도하였으며, 기동시의 정량적인 토오크의 변화를 파악하였다. 또한, 인버터 기동시 스위칭 작용에 의해 발생하는 고조파 성분의 영향으로 정현파 전압원(상용전원) 보다 토오크 및 전류 크기가 감소하고 상당히 높은 주파수 성분의 리플(백동)이 발생하고, 출력 주파수가 낮을수록 감소함을 확인하였다.

가변속 전동기로 구동되는 유도전동기는 엄격한 환경화에서 사용되고, 설치조건에 제한이 있고, 효율이 높으면서, 동시에 저속영역에서 높은 토오크, 광범위한 속도로 정 출력 특성이 필요로 하는 등, 설계상(정수·토오크 등)의 지속적인 연구가 필요하며 앞으로, 측정장비의 디지털화 및 고속화가 이루어지면 더욱더 정밀한 해석이 가능하리라 사료된다.

## 참 고 문 헌

- [1] 河泰榮 “농형 유도전동기의 정수측정에 관한 연구” 한국해양대학, 석사학위 논문, 1999.
- [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] IEEE Standard Test Procedure For Polyphase Induction Motors And Generators, 1996.
- [5] Paresh C. Sen, Principles Of Electric Machines and Power Electronics, John Wiley And Sons, Inc, 1997.
- [6] Peter F. Ryff, Electric Machinery, Prentice Hall, 1994.
- [7] 盧彰注 “다이젤 發電機의 速度制御特性에 관한 研究” 한국해양대학, 박사학위 논문, pp. 38-39, 1976.
- [8] 朴熙道 “Triac에 의한 誘導電動機의 速度制御特性에 관한 研究” 한국해양대학, 석사학위 논문, 1986.

