

---

# 유도전동기의 기동특성 예측에 관한 연구

전내석\* · 박정환\* · 조성훈\* · 이성근\* · 김윤식\*

A Study on the Starting Characteristics Prediction of Induction Motors

Nae-Suck Jeon\* · Jeung-Hwan Park\* · Sung-Hun Cho\* · Sung-Geun Lee\* · Yoon-Sik Kim\*

## 요 약

본 논문은 3상 유도전동기의 파라미터 측정방법과 기동특성을 제시한다. 고정자 권선저항, 구속 및 무부하 시험에 의해 측정된 유도전동기 파라미터를 이용하여 전동기의 기동특성을 시뮬레이션 하였다. 또한 유도전동기 축에 스트레인 게이지를 부착하여 기동토크에 대한 특성을 실험으로 확인하고 이를 시뮬레이션 결과와 비교 분석하여 그 타당성을 검증하였다.

## ABSTRACT

This paper presents methods of parameter measurement and starting characteristics of a 3 phase induction motor. The motor parameters measured by DC test, blocked rotor test, and no load test are used as the input data for computer simulation. Starting characteristics are analyzed through computer simulation using measured parameters, and the simulation results are compared with the experimental results obtained by using strain gauge attached on the motor shaft. It is conformed that the experimental results are very similar to those of the simulation.

## 1. 서 론

오늘날 산업의 발달로 자동화 및 제어기기 분야에서 동특성이 우수한 제어시스템이 요구되고 있다. 정밀하고 빠른 응답특성이 요구되는 제어용 전동기로는 대부분 직류전동기가 사용되어 왔으나 직류전동기는 정류자 및 브러시를 가지고 있어서 이에 대한 정기적인 유지 및 보수를 필요로 하는 단점이 있고, 별도의 직류전원을 필요로 한다. 이에 반해 유도전동기는 구조의 단순성과 강인성 때문에 유지보수가 용이하고 외

란에 대한 민감도가 낮으므로 각종산업의 구동원으로 널리 이용되고 있다. 특히 크기, 무게, 회전자 관성, 최대속도 발생 능력, 효율 및 비용, 운전 환경 등에서 직류전동기에 비해 우수한 특성을 가지고 있으며 구동기술의 발달로 그 적용 범위가 증가하고 있다. 유도전동기를 보다 효율적으로 운용하고 제어 특성을 향상시키기 위해서 간편한 방법으로 기기의 정확한 특성예측을 위하여 수학적 모델링이 요구되고 있으며, 이로 인해 전동기 모델상의 파라미터에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. 전동기의 모델은 근사모델이며, 전동기의 성능을 향상시키기 위해서는 이들 전동기의 파라미터에 대한 정확한 파악이 필수적이다.

---

\* 한국해양대학교 전기공학과

접수일자: 2001. 12. 13

유도전동기의 파라미터 측정은 일반적인 상용전원에서 널리 이용되고 있는 T형 등가회로를 이용하여 고장자 저항 실험, 무부하 및 구속 실험 등을 통하여 산정하였으며, 회로정수중 분리가 곤란한 누설리액턴스는 분배계수에 의해 분리하는 방법을 사용하였다 [1-4].

본 논문에서는 3상 유도전동기의 기동특성 예측을 위하여 정수 측정 시험으로 추출한 전동기의 등가 회로정수를 이용하여 유도전동기의 기동특성을 예측하였다.

## II. 정수 측정 실험

### 2.1 실험장치의 개요

본 논문에 사용된 전동기는 1HP(0.75kW), 4극, 농형 3상 유도전동기이다. 유도전동기에 전원을 공급하여 이에 대한 특성을 고찰하기 위한 실험장치의 구성은 그림 1과 같이 구성되어 있으며, 실험에 사용된 농형 유도전동기의 사양은 표 1과 같다.

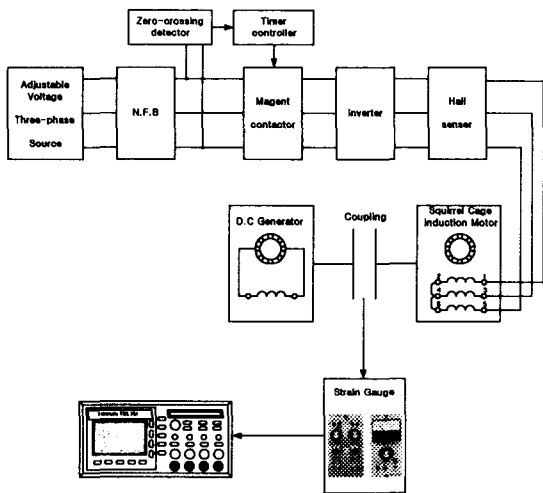


그림 1. 측정장치의 개략도  
Fig. 1 Block diagram of the measurement system

유도전동기의 기동 토크는 전동기가 회전을 시작할 때의 회전력으로 측정방법은 유도전동기와 직류발전기 커플링(coupling) 사이에 센서를 부착하여 전동기 기동순간 축의 비틀림을 계측하는 실험이다.

표 1. 유도전동기의 사양  
Table 1 Induction motor specification

Manufacturer	HICO (효성중공업)
Supply	Three-phase
Supply voltage	220/380 [V]
Rated power	0.75 [kW] (1HP)
Full-load current	3.6/2.1 [A]
Poles	4
Full-load speed	1690 [rpm]

금속은 그 물성에 따라 전기저항을 갖고 있으며, 그 저항값은 옴의 법칙에 따라 다음 식으로 주어진다.

$$R = \frac{l}{A} \rho \quad (1)$$

여기서, R : 전기저항(Ω)

l : 저항체의 길이(cm)

A : 저항체의 단면적(cm<sup>2</sup>)

ρ : 비저항(Ω·cm)

스트레인 게이지는 구조물의 길이 변화(Δl/l)를 저항값의 변화(ΔR/R)로 전환하여 인가전원에 비례한 전기적인 신호를 발생한다. 게이지의 변형값(strain: ε)은 특정한 저항값을 가진 기준저항을 이용하여 그 저항값을 휘이트스톤 브리지(wheatstone bridge) 회로에 적용시킴으로 각종 값들을 보정해주게 된다. 즉, 저항의 변화를 통해 실제로 스트레인 게이지에 변화가 생겨 게이지의 저항값의 변화가 일어난 것으로 간주하여 보정을 하게 된다[5-6].

$$\frac{\Delta R}{R} = K_s \cdot \epsilon \quad (2)$$

$$\epsilon = \frac{\Delta l}{l} \quad (3)$$

$$\mu\epsilon_{CAL} = \frac{R}{K_s \times (R_{CAL} + R)} \times 10^6 \quad (4)$$

여기서,

μϵ<sub>CAL</sub> : 원하는 변형(strain)값

K<sub>s</sub> : 게이지율(gauge factor)

R : 게이지 저항

R<sub>CAL</sub> : 측정 저항(resistance of calibration)

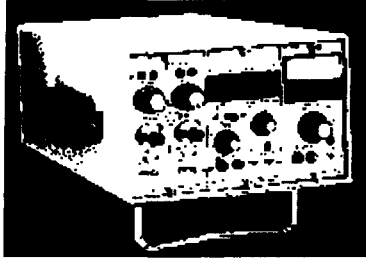


그림 2. 스트레인 게이지 시스템  
Fig. 2 Strain gauge measurement system

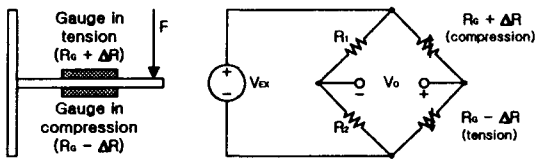


그림 3. 하프 브리지 회로  
Fig. 3 Half-bridge circuit

스트레인 게이지는 전원 공급장치와 증폭기(amplifier) 부분으로 구분되며 2개의 채널을 가지고 있다. 입력단의 선 연결은 사용하려는 게이지의 종류 및 브리지의 종류에 따라 서로 다르게 연결하게 되며, 선의 연결이 잘못되었거나 불량이 날 경우는 전체 데이터에 많은 영향을 미치게 된다. 본 논문에서는 그림 3과 같이 게이지를 하프 브리지(half bridge)로 구성하였다.

### 2.2 DC Test

고정자 저항을 측정하기 위해서 DC Test를 행한다. 이 실험은 고정자를 Y결선 한 후 직류 전류를 전동기 세 단자 중 두 단자에 흘려서 단자 저항을 측정하는 실험이다.

$$R_{dc} = \frac{V_{dc}}{I_{dc}} = 2R_Y$$

$$R_Y = \frac{1}{2} R_{dc} = R_s \quad (5)$$

측정 저항값은 측정시의 온도로 온도보상을 해주어야 한다. 보상은 IEEE Std 112 규정에 따라 식(6)과 같이 하였다[7].

$$R_s = \frac{R_Y(t_s + k)}{(t_f + k)} = \frac{1}{2} R_{dc} \cdot \frac{t_s + 234.5}{t_f + 234.5} \quad (6)$$

여기서,

$t_s$  : 절연계급에 따른 규정값(B급 95℃)

$t_f$  : 측정시 주위 온도(20℃)

$k$  : 동(구리) 도전율(234.5)

$R_{dc}$  : 측정 저항

$R_Y$  : Y결선시 상당 저항

### 2.3 The Blocked-Rotor Test

회전자 저항 및 고정자와 회전자 누설 리액턴스를 추출하기 위해 구속 실험을 행하였다. 정격 전류가 기기에 큰 부담이 되므로 전압을 0[V]에서 서서히 올려 정전압을 인가한다. 구속회전자실험은 회전자를 구속하고 수행하여 그 회전자는 회전을 막는다. 회전자는 회전할 수 없기 때문에 속도  $\omega=0$ 이고 슬립  $s=1$ 이다. 회전자 저항 및 누설 리액턴스를 구하는 식은 다음과 같다.

$$|Z_{BR}| = \frac{\sqrt{3} V_{BR}}{I_{BR}} \quad (7)$$

$$R_{BR} = \frac{P_{BR}}{3 \left( \frac{I_{BR}}{\sqrt{3}} \right)^2} = R_s + R_r \quad (8)$$

$$R_{BR} = |Z_{BR}| \cos \theta_{BR}, \quad \cos \theta_{BR} = \frac{P_{BR}}{\sqrt{3} V_{BR} \cdot I_{BR}} \quad (9)$$

$$R_r = R_{BR} - R_s = \frac{P_{BR}}{3 \left( \frac{I_{BR}}{\sqrt{3}} \right)^2} - \frac{3 V_{dc}}{2 I_{dc}} \quad (10)$$

$$X_{BR} = |Z_{BR}| \cdot \sin \theta = \sqrt{Z_{BR}^2 - R_{BR}^2} \\ = \sqrt{\left( \frac{\sqrt{3} V_{BR}}{I_{BR}} \right)^2 - \left( \frac{P_{BR}}{3 \left( \frac{I_{BR}}{\sqrt{3}} \right)^2} \right)^2} \quad (11)$$

$$X_s/X_r = 0.4/0.6 : \text{Class B 전동기} \quad (12)$$

### 2.4 No-Load Test

무부하 실험에서는 전동기는 부하와 결합되지 않고 운전되며 그 고정자에는 정격전압이 공급된다. 전동기는 아주 낮은 값의 슬립으로 운전하기 때문에 무부하 회전자 동손은 무시된다. 이 실험에서는 자화 리액턴스  $X_m$  및 전압의 변화에 대한 무부하 손실 곡선을 얻

을 수 있다. 무부하 전력 및  $X_m$ 을 구하는 식은 다음과 같다.

$$P_{NL} = P_c + P_{fw} + 3I_{NL}^2 R_s \quad (13)$$

$$P_{rot} = P_{NL} - 3I_{NL}^2 R_s \quad (14)$$

$$|Z_{NL}| = \frac{V_{NL}}{\sqrt{3}I_{NL}} \cong X_s + X_m \quad (15)$$

$$X_m = \frac{V_{NL}}{\sqrt{3}I_{NL}} - X_s \quad (16)$$

### III. 측정 결과 및 시뮬레이션

#### 3.1 정수측정 결과

계측장비로 무부하 및 구속 실험에서의 입력은 3상 전력계를 사용하였으며, 1차측 전류는 Digital clamp meter(Model명 : Model DCM910, Tektronix, Inc., USA)로 측정하였다. 실험시의 전압가변은 3상 전압조정기(voltage regulator)를 이용하였다.

유도전동기의 권선저항 측정, 구속 및 무부하 실험 결과 전동기의 정수측정 결과를 표 2에 나타내었다.

표 2. 유도전동기의 정수  
Table 2 Parameters of the induction motor

Parameter	Design value [105°C]	Measurement value [20°C]
$R_s$	13.5 [ $\Omega$ ]	9.9 [ $\Omega$ ]
$R_r$	10.5 [ $\Omega$ ]	7.5 [ $\Omega$ ]
$X_s$	21.1 [mH]	22.8 [mH]
$X_r$	31.7 [mH]	31.3 [mH]
$X_m$	250 [mH]	434 [mH]

그림 4는 유도전동기의 구속 실험 결과이다. 전압과 전류는 비례관계를,  $\cos \theta$ 는 반비례관계를 가지고 있다. 구속 실험으로부터 등가회로의 정수를 구하여 특성을 산정하는 경우, 정격전압 보다 낮은 전압에서 행하여도 정격전압에서의 특성 산정에 충분히 이용할 수 있으리라 사료된다.

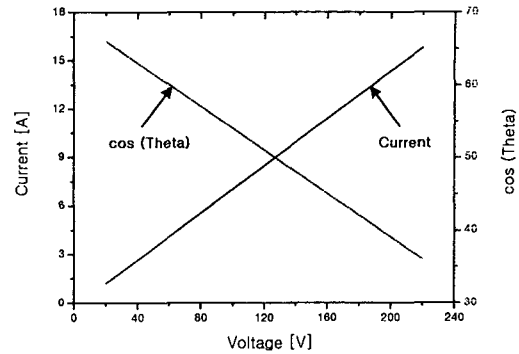


그림 4. 구속 실험  
Fig. 4 The blocked rotor test

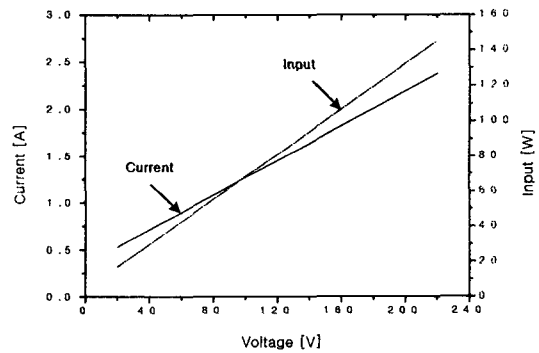


그림 5. 무부하 실험  
Fig. 5 No-load test

그림 5는 60[Hz]인 경우 유도전동기의 무부하 실험 결과이다. 전압과 전류는 비례관계를 가지고 있으며, 자기적인 포화의 영향은 거의 나타나지 않았다. 소용량의 유도 전동기에서는 일반적으로 회로 정수에 비해 여자 리액턴스가 작으며, 자기적 포화 현상이 전류를 비롯한 제특성에 미치는 영향이 작음을 알았다.

또한, 무부하 실험에서는 무부하 손실을 논할 수 있으며 이 손실을 구하기 위하여 무부하 전력을 인가전압에 대한 그래프로 나타내고, 이 그래프에서 동손분을 제거하여 새로운 전력곡선(무부하전력-동손)을 구하였다. 여기서 세로축에 외삽법(보간법)을 적용시켜 그림 6과 같이 나타내었다[8].

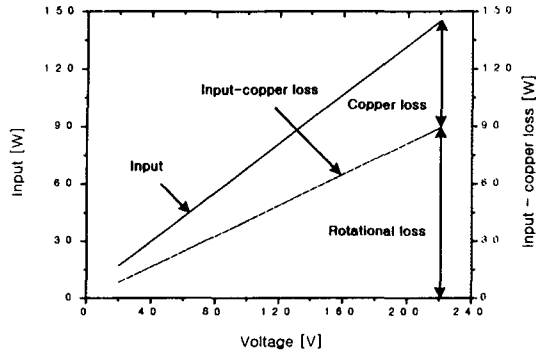
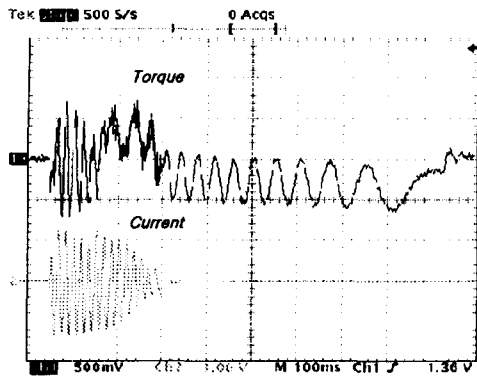


그림 6. 무부하 입력전력 및 손실  
Fig. 6 Variation of input power and no load loss

### 3.2 실험 및 시뮬레이션

유도전동기에 전원을 공급하여 그에 대한 토크 및 전류 특성을 고찰하고 파형을 오실로스코프로 관찰하였다.



Ch 1 : torque(4Nm/div), Ch 2 : current(5A/div)  
그림 7. 전동기 기동시의 토크 및 전류  
Fig. 7 Torque and current of the motor with starting

그림 7은 유도전동기의 기동토크 및 전류 파형이다. 토크 측정은 스트레인 게이지(strain gauge)의 출력전압을 오실로스코프 파형으로 나타낸 것으로 이 파형에는 전동기 토크 변형과 고무형 탄성커플링으로 인한 탄성체의 진동 변형을 함께 포함하고 있다. 전류 측정은 전류검출회로(hall sensor)의 출력전압을 측정함으로써 정상상태에서는 전류의 변화가 감소하였다.

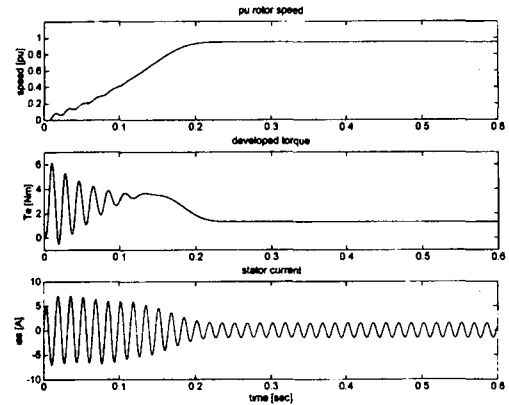


그림 8. 시뮬레이션 파형  
Fig. 8 Simulation results

그림 8은 MATLAB/Simulink를 이용한 동적 시뮬레이션 결과로 유도전동기 무부하 기동특성을 나타내고 있다[9-11]. 정상상태까지 도달 시간이 0.22[sec] 정도로 실제 기동시 응답 파형과 거의 일치함을 보여주고 있다.

### N. 결론

본 논문에서는 권선 저항 측정, 구속 및 무부하 실험 결과로부터 농형 유도전동기의 등가회로 정수를 산정 하였으며 공장 설계값의 결과와 비교 검토한 결과 다소의 오차는 있었으나 대체로 만족할 만한 결과를 얻었다. 즉, 고정밀도의 고가 장비 없이 간단한 측정장비 및 실험을 통하여도 정밀도가 높은 회로정수를 산정할 수 있었다. 또한, 3상 유도전동기의 기동특성 예측을 위해 정수추정 실험으로 추출한 전동기의 등가회로 정수를 입력으로 MATLAB/Simulink를 이용하여 시뮬레이션을 행하였다.

본 논문의 결과는 간단한 정수 측정으로 유도전동기의 과도상태 응답을 확인할 수 있었고, 전동기의 기동특성 개선에 좋은 자료가 될 것으로 사료된다.

### 참고 문헌

- [1] S. A Nasar, Handbook Of Electric Machines, McGraw-Hill Book Company, 1987
- [2] Paresh C. Sen, Principles Of Electric Machines And Power Electronics, John Wiley And Sons, Inc, 1997
- [3] John G. Kassakian, Principles Of Power Electronics, Addison-Wesley Publishing Co., 1991
- [4] Peter F. Ryff, Electric Machinery, Prentice Hall, 1994
- [5] The Measurement Group, Strain Gauge 2100 System Operation Manual, 1995
- [6] <http://www.straindaq.com/tutorial.htm>(submitted by The Measurement Group)
- [7] IEEE Standard Test Procedure For Polyphase Induction Motors And Generators, 1996
- [8] Peter Vas, Parameter Estimation Condition Monitoring And Diagnosis Of Electrical Machines, Oxford Science Publications, 1993
- [9] C.M.Ong, Dynamic simulation of electric machinery using MATLAB/Simulink, Prentice Hall, Inc., 1998
- [10] MATLAB Reference Guide, The Mathworks Inc., 1992
- [11] Simulink User's Guide, The Mathworks Inc., 1992

### 저자 소개



전내석(Nae-Suck Jeon)

1994년 부경대학교 제어계측공학과 졸업  
 1999년 한국해양대학교 기관공학과 졸업 (석사)  
 현재 동대학원 전기공학과 재학중 (박사과정)

※ 관심분야 : 전력전자, 전기기기, 제어시스템



박정환(Jeung-Hwan Park)

1998년 한국해양대학교 전기공학과 졸업  
 2001년 동대학원 전기공학과 졸업(석사)  
 현재 동대학원 전기공학과 재학중 (박사과정)

※ 관심분야 : 전력전자, 태양광/풍력발전, 제어시스템



조성훈(Sung-Hun Cho)

1998년 한국해양대학교 전기공학과 졸업  
 2000년 동대학원 전기공학과 졸업 (석사)  
 현재 동대학원 전기공학과 재학중 (박사과정)

※ 관심분야 : 마이크로프로세서응용, 벡터제어, 디지털 조속기시스템, Real-time 시뮬레이션 시스템



이성근(Sung-Geun Lee)

1983년 한국해양대학교 기관학과 졸업  
 1990년 동대학원 기관학과 졸업 (석사)  
 1998년 동대학원 졸업(박사)  
 현재 한국해양대학교 전기전자공학부 조교수

※ 관심분야 : 선박용 전기기기 및  $\mu$ -프로세서 응용



김윤식(Yoon-Sik Kim)

1977년 한국해양대학교 기관학과 졸업  
 1979년 동대학원 기관학과 졸업 (석사)  
 1986년 동경공업대학 대학원 졸업(석사·박사)

현재 한국해양대학교 전기전자공학부 교수

※ 관심분야 : 전력전자, 디지털가버너, MHD 발전