

# 농형 유도전동기의 정수측정에 관한 연구

하 태 영\* · 김 윤 식\*\*

## A Study on the Equivalent Circuit Constants and Characteristics Measurement of Induction Motor

Tae-Young Ha\* · Yoon-Sik Kim\*\*

### Abstract

This paper describes a technique for measuring the constants of three-phase induction motors during normal operation. Two tests are described which are suitable to obtain the electrical parameters of symmetrical three-phase induction machines. These are the locked rotor test and the no-load test. By the application of these tests, it is possible to determine the parameters which are present in steady state equivalent circuit of an induction machine. And so this paper describes the motor speed torque characteristics. While focusing principally on the test method itself, this paper also discusses measuring motor no load loss and inertia coefficient  $J$  and viscous friction coefficient  $B$  by retardation test. The measured results were satisfied by compare with experimental and maker tested results.

### 제 1 장 서 론

본 논문에서는 유도 전동기의 정수를 측정하기 위해 널리 이용되고 있는 L형 등가 회로를 이용하여, 이 때의 각 회로 정수는 철손을 무시한 상태에서 해석적인 방법이나, 각종 시험 즉 무 부하 시험, 구속 시험, 고정자 저항 시험 등을 통하여 산정하고 있다. 그리고 관성 모멘트 및 점성 마찰계수를 회전 중에 산정 하는 방법을 제시하였고 회로

\* 한국해양대학교 전기공학과 석사과정

\*\* 한국해양대학교 전기공학과 교수

정수 중 분리가 곤란한 누설 리액턴스는 분배계수에 의해 분리하는 방법을 사용하였다. 실험에서 구한 정수의 유효성을 입증하기 위하여 메이커 테스터 결과와 비교 검토하였다.

## 제 2 장 유도전동기 정수 측정

### 2.1 유도전동기의 등가회로

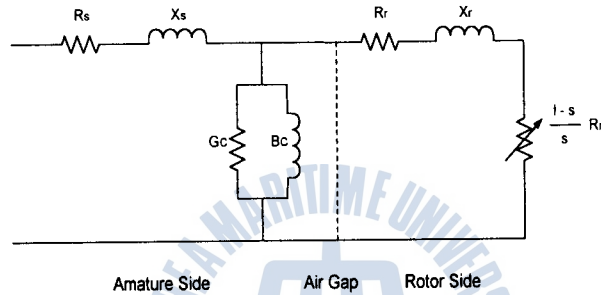


Fig. 2.1 Equivalent circuit for induction motor

### 2.2 측정 장치의 구성

전체적인 실험장치는 그림 2.2과 같이 3상 교류 전압 조정기, IGBT 인버터,

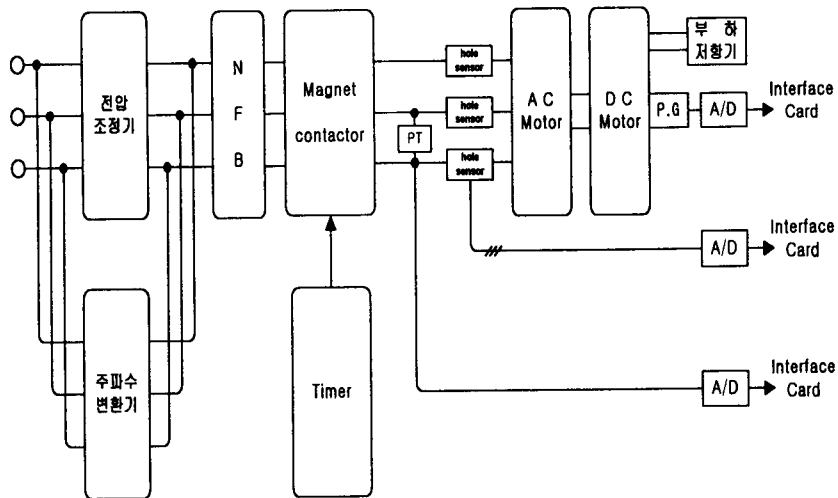


Fig. 2.2 Block diagram of measurement system

0.75[Kw] 3상 유도전동기(hico) 및 0.75[Kw] 분권 직류발전기(ckl) 부하 저항기 및 전력계, 전류 검출회로(hall sensor hcd hic) 역률 측정 장치, 인터페이스 카드 등으로 구성되어 있고, 전동기 축에는 속도측정을 위해 D.C 타코 제너레이터(30V/1000 rpm)를 부착하였다. 또한 역률 측정 장치를 이용하여 기동 시 및 부하 변동 시 역률을 관측할 수 있게 하였다.

### 2.3 고정자 권선 저항 측정

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

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

온도 보상은 IEEE STD 112 규정에 따라 식 (2-2)로 하였다<sup>[6]</sup>.

$$R_s = \frac{R_s(t_s + k)}{(t_t + k)} \tag{2-2}$$

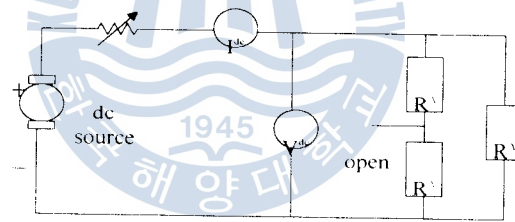


Fig. 2.3 Direct current measurement of stator winding resistance

### 2.4 구속시험

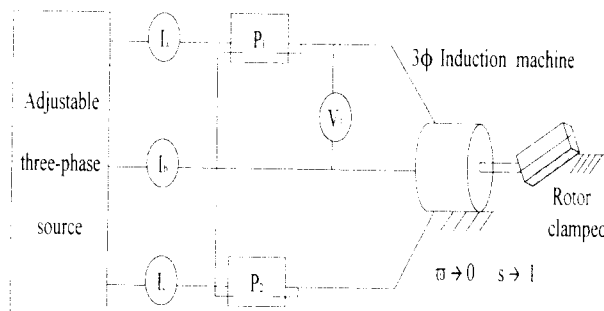


Fig. 2.4 The locked rotor test circuit.

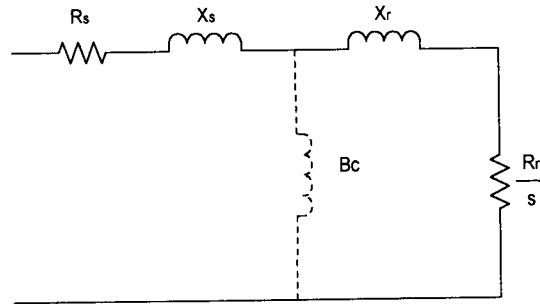


Fig. 2.5 Equivalent circuit at locked rotor test

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

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

Table 2.1 구속 시험 측정값(20°C)

전압	선전류	cos θ	전력(3상)	주파수
53[V]	3.55[A]	0.6573	214.2[W]	60[Hz]

$$X'_{BR} = \sqrt{Z_{BR}^2 - R_{BR}^2} = \sqrt{\left(\frac{\sqrt{3} V_{BR}}{I_{BR}}\right)^2 - \left(\frac{P_{BR}}{3 \left(\frac{I_{BR}}{\sqrt{3}}\right)^2}\right)^2} \tag{2-5}$$

여기서, 정격 주파수를  $f_B$ 로 구속시험 주파수를  $f_t$ 라 하면 식 (2-6)와 같이되고

$$X_{BR} \cong \frac{f_B}{f_t} X'_{BR} \tag{2-6}$$

그래서, 누설 리액턴스는 주파수에 거의 비례적으로 되고 여기서  $f_t = f_B$ 로 정의하면 식 (2-7)이 성립된다.

$$X_s + X_r = X_{BR} = \frac{f_B}{f_t} X'_{BR} \tag{2-7}$$

농형 유도전동기에서는  $X_{BR}$ 의 얼마가  $X_s$ 이고  $X_r$ 인지 알 수 있는 방법은 없다. 그래

서, NEMA에서 권고하고 있는 Table 2.2로 분할하였다<sup>[2]</sup>.

Table 2.2 NEMA 권고 리액턴스 분할표(60 Hz)

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

Table 2.3 누설 리액턴스 측정값

$X_s$ (stator leakage reactance)	$X_r$ (rotor leakage reactance)
7.79[Ω]	11.68[Ω]

### 2.5 무 부하 시험

무 부하 시험은 변압기의 개방 시험에 대응하는 것으로서 여기서 마찰손 풍손 철손 및  $X_m$ 을 구할 수 있다. 그림 2.6 및 2.7는 테스트 회로의 등가회로와 무 부하 시 회로의 효과를 보이고 있다.

$$P_{nl} \equiv P_1 + P_2 = SCL_{nl} + P_{fuc} \tag{2.8}$$

$$P_{fuc} = P_{nl} - 3I_{nl}^2 \cdot R_s \tag{2.9}$$

$$X_m = \frac{\sqrt{3} V_{nl}}{I_{nl}} - X_s \tag{2-10}$$

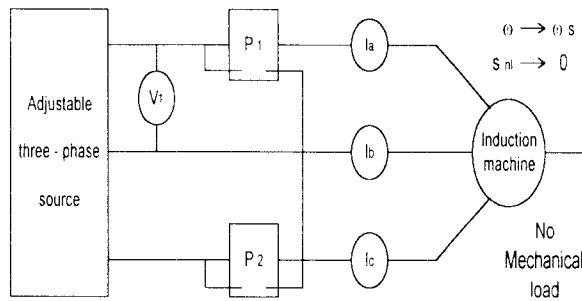


Fig. 2.6 No load test circuit

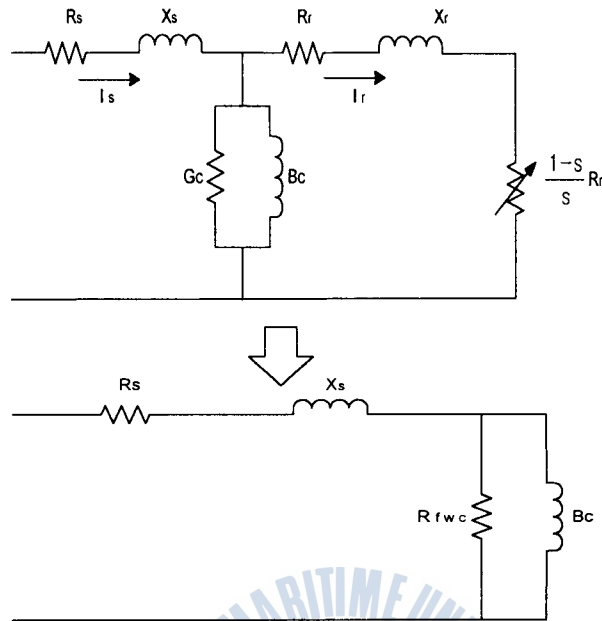


Fig. 2.7 Equivalent circuit at no load test

Table 2.4 3상 각 손실 측정값

Xm(자화리액턴스)	144.02[Ω]
철손저항	4608.29[Ω]
마찰손+풍손	22.39[W]
철손	26.16[W]
동손	68.99[W]

## 2.6 감속 시험 (J and B 측정)

고전적인 방법의 하나로서 전기 기기의 관성 모멘트 및 점성 마찰계수를 구하는 감속 실험으로 위의 두 계수를 구하는 방법을 논하여 보자. 여기서는 유도전동기를 무부하 정상 상태로 운전하여 순간적으로 고정자에 전원 라인을 분리시키고 이 때 회전자의 각 가속도 및 각 속도를 모니터링 하면 식 (2-11)과 같이 되고,

$$J \frac{d\omega_{r1}}{dt} + B\omega_{r1} = 0 \quad (2-11)$$

이번에는 이미 관성 모멘트를 알고 있는 디스크를 회전자에 연결하고 위와 동일한 실험을 하면 이 때는 식 (2-12)을 얻을 수 있다.

$$(J + J_D) \frac{d\omega_{r2}}{dt} + B\omega_{r2} = 0 \quad (2-12)$$

이제 미지수 둘 식이 둘이므로 이원 일차 연립방정식을 풀면 간단하게 J 및 B를 동시에 구할 수 있다.

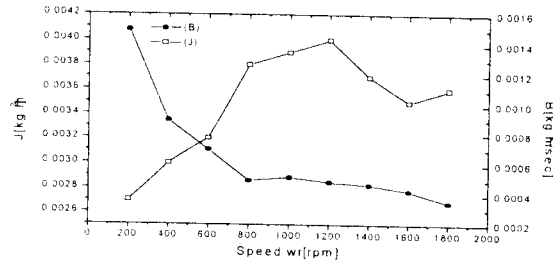


Fig. 2.8 Motor moment of inertia and viscous friction coefficient

### 제 3 장 실험 및 결과 검토

#### 3.1 토크-슬립 특성 분석

$$T = \frac{P_d}{\omega} = \frac{V_t^2 R_r}{S \omega_s [(R_s + \frac{R_r}{S})^2 + X_{eq}^2]} \quad (3-1)$$

##### 3.1.1 무 부하 시 (슬립 S=0에 가까울 때)

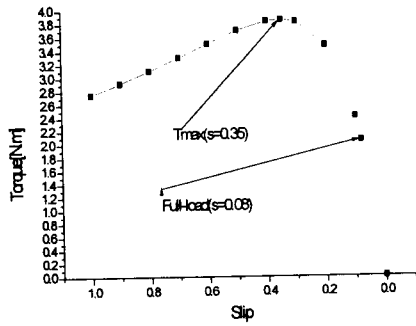
$$T \cong \frac{V_t^2 R_r}{S \omega_s (\frac{R_r}{S})^2} = \frac{V_t^2 S}{\omega_s R_r} \quad (3-2)$$

##### 3.1.2 기동 시 (S=1)

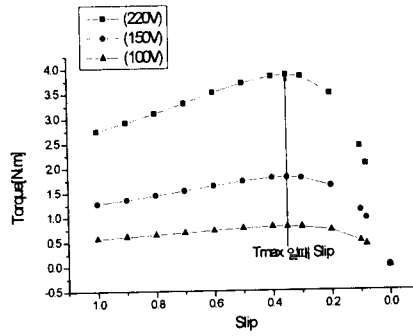
$$T_{기동시} = \frac{V_t^2 R_r}{\omega_s (R_{eq}^2 + X_{eq}^2)} \quad (3-3)$$

##### 3.1.3 최대 토크 계산

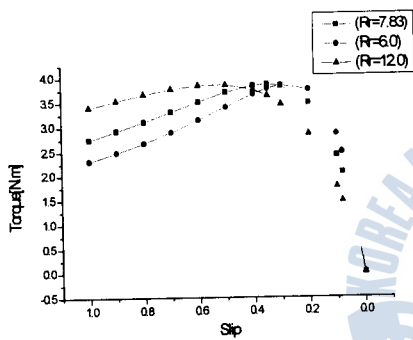
$$T_{max} = \frac{V_t^2}{2 \omega_s [R_s + \sqrt{R_s^2 + X_{eq}^2}]} \quad (3-4)$$



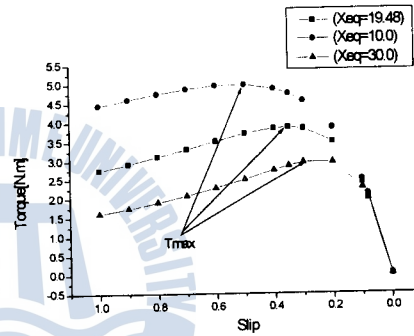
(a) 토크-속도 특성 곡선



(b) 전압 변동 시 토크 곡선



(c) Rr 변화에 따른 토크 곡선



(d) Xeq 변화에 따른 토크 곡선

Fig. 3.1 Torque slip curves of varying constants

### 3.2 메이커 설계 정수 값과 실험 측정 정수 값 비교

Table 1.1 시험기 사양

Manufacturer	HICO (효성중공업)
Supply	Three-phase
Supply Voltage(v)	220/380 (60 Hz)
Rated Power(hp)	1 (0.75 Kw)
Full-Load Current(A)	3.6/2.1
Poles	4
Full-Load Speed(rpm)	1656



Table 3.1 메이커 정수 값 및 실험 정수 값 비교

정 수 명	Maker Data	측정 Data
$R_s$ [ $\Omega$ ]	13.48[105℃]	10.95[25℃]
$R_r$ [ $\Omega$ ]	10.5[105℃]	7.83[25℃]
$X_s$ [ $\Omega$ ]	8.61	7.79
$X_r$ [ $\Omega$ ]	11.79	11.68
$G_m$ [ $\sigma$ ]	0.000333	0.000217
$B_m$ [ $\sigma$ ]	0.006114	0.006943
J [ $\text{kg}\cdot\text{m}^2$ ]	0.003	0.0023
정격 토크 [ $\text{kg}\cdot\text{m}$ ]	0.44	0.39

Table 3.1에서 보면 메이커 설계 값과 실험 측정값이 아주 유사함을 확인 할 수 있고 고정자 저항 및 회전자 저항은 측정 온도의 차이에 의해 측정값이 설계 값 보다 작음을 알 수 있다.

## 제 4 장 결론

본 연구에서는 권선 저항 측정, 구속시험 및 무 부하 시험 결과로부터 유도전동기의 등가회로 및 회로정수를 산정 하였으며 메이커 실험 결과와 비교한 결과 매우 만족할 만한 결과를 얻었다. 즉 고정도의 측정장비 및 특수인버터와 같은 고가의 장비 없이 간단한 측정장비 및 실험을 통하여도 정밀도가 높은 회로정수를 산정 할 수 있었다. 또한 컴퓨터 시뮬레이션 및 실험을 통해 본 논문에서 얻은 결과를 요약하면 다음과 같다.

- (1) 권선 저항 측정 시험 및 구속, 무 부하 시험으로 농형 유도전동기의 정수 값을 정밀하게 측정 할 수 있었다.
- (2) 컴퓨터 시뮬레이션에서 정수 변화 시 토크 슬립 특성 변화 등을 알 수 있었고 전동기 설계 시 유용한 수단이 될 수 있음을 확인하였다.
- (3) J 및 B를 감속 시험에서 아주 정밀하게 구 할 수 있었고 감속 시작 속도의 변화에 따라 거의 일정한 측정값을 구할 수 있음을 확인하였다.

앞으로 측정장비의 디지털화 및 고속화가 이루어지면 더욱더 정밀한 특성해석이 가능 하리라 사료되며 지속적인 연구가 이루어져야 할 것으로 생각된다.

## 참 고 문 헌

- [1] Paul C. Krause, *Analys 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 Mpherson And Robert D.Laramore, *An Introduction To Electrical Machines And Transformers*, John Wiley And Sons, Inc. 1990.
- [6] IEEE Standard Test Procedure For Polyphase Induction Motors And Generators, 1996.
- [7] Arthur W.Keley et.al., "On-Line Wideband Measurement Of Induction Motor Impedance" 0-7803-3008-0/95 IEEE pp. 647-654, 1995.
- [8] Paresh C. Sen, *Principles of Electric Machines and Power Electronics*, John Wiley And Sons, Inc, 1997.

