

碩士學位論文

인버터 구동시의 유도전동기의  
정상상태 특성

指導教授 左 宗 根



111.336

濟州大學校 産業大學院

電子電氣工學科

鄭 榮 俊

2001

# 인버터 구동시의 유도전동기의 정상상태 특성

指導教授 左 宗 根

이 論文을 工學 碩士學位 論文으로 提出함.




2001年 6月 日

濟州大學校 産業大學院  
電子電氣工學科  
電氣工學專攻

鄭 榮 俊

鄭榮俊의 工學 碩士學位 論文을 認准함.

2001年 6月 日

委 員 長	이	거명	
委 員	金	豪贊	
委 員	左	宗根	

# 목 차

LIST OF FIGURES .....	ii
LIST OF TABLES .....	iii
Summary .....	iv
I. 서 론 .....	1
II. 등가회로 정수와 특성식 .....	3
1. $\Gamma$ 형 등가회로 .....	3
2. 등가회로 정수의 결정 .....	4
2.1 고정자 권선저항 측정 .....	4
2.2 무부하시험 .....	4
2.3 구속시험 .....	5
2.4 $\Gamma$ 형 등가회로 정수 .....	7
3. T형 등가회로 정수 .....	8
4. 특성식 .....	9
III. 해석결과 및 검토 .....	11
IV. 결 론 .....	16
참고문헌 .....	17

## LIST OF FIGURES

Fig. 1 $\Gamma$ type equivalent circuit .....	3
Fig. 2 Simplified no-load equivalent circuit .....	5
Fig. 3 Simplified block-rotor equivalent circuit .....	6
Fig. 4 T type equivalent circuit .....	8
Fig. 5 Characteristics of induction motor driven by inverter source. .....	14



## LIST OF TABLES

Table 1 $\Gamma$ type equivalent circuit parameters of tested motor .....	11
Table 2 T type equivalent circuit parameters of tested motor .....	11
Table 3 Results of characteristics of tested induction motor (1) .....	12
Table 4 Results of characteristics of tested induction motor (2) .....	12



# Steady State Characteristics of Induction Motor Driven by Inverter Source

Young-Jun Jeong

Department of Electronic and Electrical Engineering  
Graduate School of Industry  
Cheju National University

Supervised by professor Chong-Keun Jwa

## Summary

In this paper, the  $\Gamma$  type equivalent circuit is used to analyze the steady state characteristics of induction motor driven by inverter source. The base tests for equivalent circuit parameters of induction motor are a no-load test by rated frequency (60Hz) and a blocked rotor test by 25% of rated frequency (15Hz) which are performed with inverter source, and measurement of the dc resistance of the stator winding. To determine more accurate parameters, four simultaneous equations obtained from equivalent circuit of the no-load test and blocked rotor test are solved by using initial values which are evaluated from simplified equivalent circuits. The induction motor performances are computed by using these parameters and compared with measured values of the tested motor. Then it is found that the compared results show good agreement between them.

## I. 서론

전력계통에서 고조파에 의한 영향은 전력회사, 기기 제작자, 그리고 사용자에게 오랫동안 문제가 되어왔다. 이 고조파의 발생원인은 1) 전력전자장치, 2) 가포화 리액터 응용계통, 3) 아크로와 전기용접, 4) 배전계통의 역율 조정용 커패시터 뱅크, 그리고 5) 송전선의 직렬리액터 등이 있다. 이 가운데 커패시터와 인덕터는 고조파를 발생하지 않지만, 기존의 고조파 레벨을 확대할 수 있는 공진 문제를 초래할 수 있다(Lee, 1999). 또한, 전력계통에서 유도전동기는 가장 큰 부하이로 산업체, 상업시설, 그리고 가전제품에 널리 이용되고 있다.

유도전동기에 고조파를 포함한 전압이 인가되면 정현파 전압이 인가된 경우에 비하여 효율이 떨어지고(Fujimaki, 1984), 온도가 상승하여 운전 특성에도 영향을 미친다(Lee, 1999). 이에 따라 많은 연구자들이 이 문제에 대하여 관심을 가지고 연구하여 오고 있다. Dogett와 Queer(1929)는 비정현파 인가전압에 의한 유도전동기의 운전 특성을 정현파 전원에 의한 특성과 비교하였고, Jain(1964)은 전압파형이 유도전동기의 성능에 미치는 영향을 Fourier 급수에 의하여 파형을 분석하고 해석하였다. Klingshirn과 Jordan(1968)은 비정현파전압원에 의한 다상 유도전동기의 성능과 손실에 대하여, 그리고 Lee(1999)는 다양한 전압 왜형률하에서 고조파 차수가 2에서 13까지 각각의 고조파에 대한 영향을 조사하기 위하여 실험을 하였다.

비정현파 전원에 의한 유도전동기의 특성계산을 위하여 Jain은 T형 등가회로를, Fujimaki와 Miyashita는  $\Gamma$ 형 등가회로를 사용하여 전압 파형을 조파분석하고 고조파등가회로를 구성하여 계산하였다. 인버터에 의한 유도전동기의 가변속운전이 많은 분야에서 적용됨에 따라 Yamada(1983)는 T형등가회로를 사용하되 고조파 성분의 영향을 고려한 회로정수를 인버터에 의한 왜형과 전원시험법에 의하여 결정하여 특성

을 계산하였다. Fujimaki와 Miyashita는 보통 농형 유도전동기를 대상으로 하여 고정자측에 대해서는 고정자 철심의 와전류가, 회전자측에 대해서는 슬롯중의 도체 전류의 표피효과가 전동기의 회로정수에 미치는 영향을 고려한 회로정수를 고정자 권선의 직류저항 측정, 정격주파수에 의한 무부하시험 및 2개의 다른 주파수 (정격과 정격의 25%)에 의한 구속 시험에서 결정하였다.

그러나 Yamada의 왜형파 전원 시험법에 의한 회로정수에는 계산 오차가 포함 될 수 있고, Fujimaki과 Miyashita의 방법은 조파 분석을 포함하여 계산절차가 복잡하다. 그러므로 본 논문에서는 위의 단점을 보완하기 위하여  $I$  회로를 사용하고 회로정수는 고정자 권선의 직류저항 측정, 인버터 전원에 의한 정격주파수 무부하시험, 그리고 정격의 25% 주파수에 의한 구속시험에서 비교적 정확하게 결정할 수 있는 방법을 제시하였다. 또한 이 등가회로에 의하여 계산한 유도전동기의 운전특성과 T형 등가회로에 의한 운전특성을 실험에 의한 실측치와 비교하여 제안한 방법의 타당성을 입증하였다.



## II. 등가회로와 특성식

### 1. $\Gamma$ 형 등가회로

인버터에 의하여 구동되는 가변속 유도전동기의 정상상태 특성을 해석하기 위하여  $\Gamma$ 형 등가회로를 사용하였다. 이 등가회로는 고정자 전압과 주파수의 비가 일정, 즉 고정자 자속을 일정하게 유지하여 운전하는 구동장치 해석에 적합한 것으로 알려져 있다(Slemon, 1989). 또한 고정자와 회전자의 누설리액턴스를 분리할 필요도 없다(Ishizaki et al 1967).

Fig. 1은 해석에 사용한  $\Gamma$ 형 등가회로이고 해석을 위하여 다음의 가정을 둔다.

1. 인버터 전원의 3상 전압파형은 같고 서로  $120^\circ$ 의 위상차를 가진다.
2. 고정자 저항은 주파수의 영향을 무시한다.
3. 철손과 기계손은 여자회로의 저항으로 대표한다.

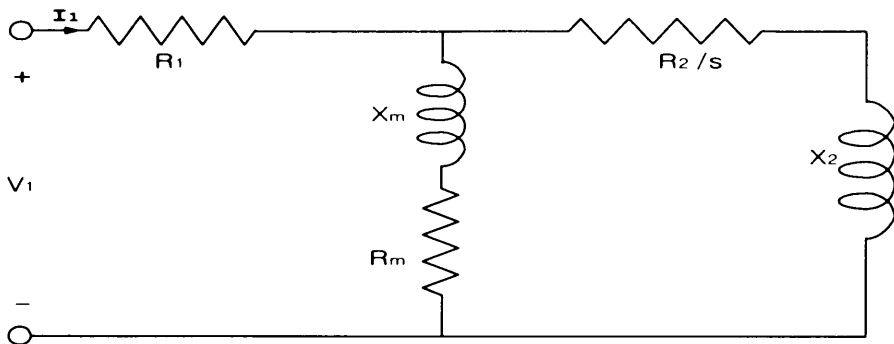


Fig. 1  $\Gamma$  type equivalent circuit

등가회로에서 기호는 다음과 같다.

$V_1$  : 고정자상전압

$I_1$  : 고정자상전류

$R_1$  : 고정자권선저항

$X_m$  : 여자리액턴스와 고정자 권선 누설리액턴스

$R_m$  : 철손과 기계손을 대표하는 저항

$R_2$  : 회전자권선저항

$X_2$  : 고정자와 회전자권선 누설리액턴스의 합

$s$  : 슬립

## 2. 등가회로정수의 결정

Fig. 1의  $\Gamma$ 형 등가회로에서 인버터에 의한 가변속 운전시 고조파 성분의 영향을 고려한 회로정수를 왜형과 전원시험법을 변형하여 결정한다. 시험은 고정자권선의 직류저항 측정, 인버터에 의한 정격주파수의 무부하시험, 그리고 정격의 25% 주파수에 의한 구속시험으로 한다. 이 시험 결과를 사용하여 다음과 같은 과정으로 등가회로 정수를 결정한다.

### 2.1 고정자 권선 저항 측정

유도전동기 고정자 권선이 Y결선된 경우의 1상의 저항을 전압강하법에 의하여 측정한다. 권선 2단자에서 측정한 단자전압을  $V_{dc}$ , 전류를  $I_{dc}$ 라고 하면 1상의 저항  $R_1$ 은 다음과 같다.

$$R_1 = \frac{1}{2} \frac{V_{dc}}{I_{dc}} \quad (1)$$

이 때 전류는 정격 운전 조건과 같도록 정격 전류로 한다.

## 2.2 무부하 시험

인버터에 의한 정격 주파수의 무부하 시험 결과, 측정된 1상의 전압, 전류, 그리고 입력을 각각  $V_0$ ,  $I_0$ , 그리고  $P_0$ 라 하면 Fig. 2의 단순화된 무부하 등가회로에서  $X_m$ 과  $R_m$ 을 구하면 다음과 같다.



Fig. 2 Simplified no-load equivalent circuit

$$Z_0 = \frac{V_0}{I_0} \quad (2)$$

$$R_m = \frac{P_0}{I_0^2} \quad (3)$$

$$X_m = \sqrt{(Z_0^2 - R_m^2)} \quad (4)$$

여기서,  $Z_0$ 는 무부하 임피던스이다

### 2.3 구속시험

인버터에 의한 정격의 25%주파수 구속시험결과 측정된 1상의 전압, 전류, 그리고 입력을 각각  $V_s$ ,  $I_s$ , 그리고  $P_s$ 라 하면 Fig. 3의 단순화한 구속시 등가 회로에서  $R_2$ 와  $X_2$ 를 구하면 다음과 같다.



Fig. 3 Simplified block-rotor equivalent circuit

$$Z_s = \frac{V_s}{I_s} \quad (5)$$

$$R_s = R_1 + R_2 = \frac{P_s}{I_s^2} \quad (6)$$

$$X_2 = \sqrt{Z_s^2 - R_s^2} \quad (7)$$

$$R_2 = R_s - R_1 \quad (8)$$

여기서,  $Z_s$ 는 구속 임피던스이다.

## 2.4 $\Gamma$ 등가회로 정수

유도전동기 시험시 Fig. 1의 등가회로에서 무부하에서는 슬립이 0이 아니므로 무부하시 슬립을 고려하여야하고, 구속상태에서는 기계손은 무시할 수 있지만, 정지상태에서 운전상태까지는 이 등가회로에 의하여 특성을 산정하고 있다.

따라서 회로정수를 정도 높게 계산하려면 Fig. 1의 등가회로를 사용하여 무부하 시험과 구속시험 결과를 적용하여야 한다.

등가회로에서  $Z_1 = R_1$ ,  $Z_m = R_m + jX_m$ ,  $Z_{20} = R_2/s + jX$  (무부하시),  $Z_{2s} = R + jX$  (구속시)이라 하면, 무부하시에는

$$Z_0 = \frac{V_0}{I_0} = \left| Z_1 + \frac{Z_m Z_{20}}{Z_m + Z_{20}} \right| \quad (9)$$

$$P_0 = \operatorname{Re} \left( Z_1 + \frac{Z_m Z_{20}}{Z_m + Z_{20}} \right) I_0^2 \quad (10)$$

의 관계가 성립하며, 구속시에는

$$Z_s = \frac{V_s}{I_s} = \left| Z_1 + \frac{Z_m Z_s}{Z_m + Z_s} \right| \quad (11)$$

$$P_s = \operatorname{Re} \left( Z_1 + \frac{Z_m Z_s}{Z_m + Z_s} \right) I_s^2 \quad (12)$$

의 관계가 성립하여야 한다.

따라서, 식 (9), (10), (11), (12) 을 연립하여  $R_m$ ,  $X_m$ ,  $R_2$ ,  $X_2$  를 결정할 수 있다. 이들 등가 회로정수를 결정하기 위해서 직류저항 측정, 무부하시험, 그리고 구속시험을 이용하여 단순화된 등가회로에서 계산된 값을 초기값으로 사용한다.

### 3. T형 등가회로

T형 등가회로는 Fig. 4와 같고, 여기서  $X_1$ 은 고정자권선 누설리액턴스,  $X_2$ 는 회전자 권선 누설리액턴스로 정의한다.

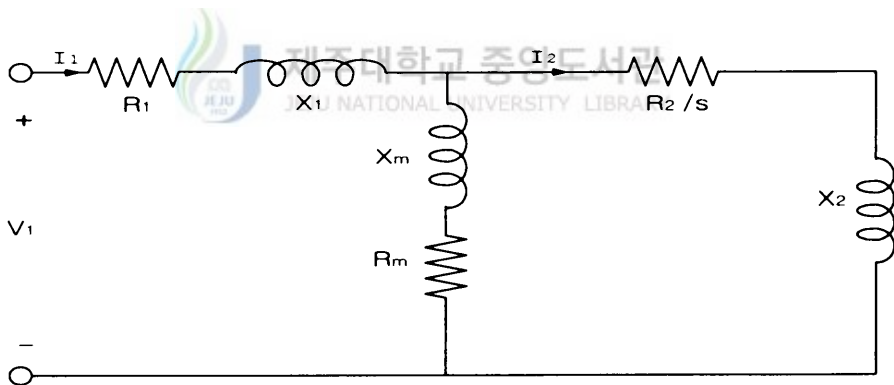


Fig. 4 T type equivalent circuit

정수 결정을 위하여 앞서 측정한 고정자 권선저항 측정과 무부하 시험에서  $X_0$ 과  $R_m$ 을 구하면 다음과 같다.

$$P_0 = I_0^2 (R_1 + R_m) \quad (13)$$

$$\frac{V_0}{I_0} = \sqrt{(R_1 + R_m)^2 + (X_1 + X_m)^2} \quad (14)$$

$$X_0 = X_1 + X_m \quad (15)$$

여기서,  $X_0$ 는 고정자 권선 누설임피던스와 여자리액턴스의 합이다.

구속시험의 경우에는  $\Gamma$ 형 회로에서의 식 (5), (6)과 같으며, 다만  $X_1$ 과  $X_2$ 를 같다고 놓으면 다음과 같다.

$$X_1 + X_2 = \sqrt{Z_S^2 - R_S^2} \quad (16)$$

$$X_1 = X_2 = \frac{X_1 + X_2}{2} \quad (17)$$

$$X_m = X_0 - X_1 \quad (18)$$

식 (13) - (18)까지에서 기존의 T형 등가회로 정수  $R_1$ ,  $X_1$ ,  $R_m$ ,  $X_m$ ,  $R_2$ ,  $X_2$ 를 결정할 수 있다.

#### 4. 특성식

위에서의 결정된 등가회로의 정수를 가지고 Fig. 1, Fig. 4의 등가회로에 적용하여 유도전동기의 특성식을 구하면 다음과 같다.

등가회로에서 입력 임피던스를  $Z$ , 여자 임피던스를  $Z_m = R_m + jX_m$ , 2차 권선 임피던스  $Z_2 = R_2/s + jX_2$ , 회전수  $N$  (rpm), 슬립  $s$ 로 표시

한다. 또한 1차 임피던스  $Z_1$ 은  $\Gamma$ 형 등가회로에서  $Z_1 = R_1$  이고, T형 등가회로에서는  $Z_1 = R_1 + jX_1$  이다.

$$\text{입력 임피던스 } Z = Z_1 \cdot \frac{Z_m Z_2}{Z_m + Z_2} \quad (19)$$

$$\text{1차 전류 } I_1 = \frac{V}{\sqrt{3} \cdot Z} \quad (20)$$

$$\text{1차 입력 } P_1 = 3I^2 Re(Z) \quad (21)$$

$$\text{2차 전류 } I_2 = I_1 \cdot \frac{Z_m}{Z_m + Z_2} \quad (22)$$

$$\text{2차 입력 } P_2 = 3|I_2|^2 Re(Z_2) \quad (23)$$

$$\text{출력 } P = P_2 \cdot (1 - s) \quad (24)$$

$$\text{역율 } pf = \frac{Re(Z)}{\sqrt{Re(Z)^2 + Im(Z)^2}} \quad (25)$$

$$\text{토크 } T = \frac{9.8 \cdot P}{1.027 \cdot N} \quad (N \cdot m) \quad (26)$$



### III. 해석결과 및 검토

제안한 방법의 타당성을 검증하기 위하여 사용한 3상 농형 유도전동기의 정격은 4극, 208V, 1.2A, 175W, 1670rpm이고 Y결선으로 시험하였다. 인버터는 PWM 전압형 인버터를 사용하였다.

인버터전원에 의하여 운전되는 유도전동기의 특성을 계산하기 위한  $\Gamma$ 형 등가회로의 회로정수를 전압강하법에 의한 고정자 권선 저항 측정, 인버터 전원에 의한 60Hz 무부하 시험, 그리고 15Hz 구속시험결과 계산한 회로정수를 Table 1에 보였다. 그리고 인버터 전원시험으로 기존의 T형 등가회로 정수를 계산한 결과를 Table 2에 보였다.

Table 1  $\Gamma$  type equivalent circuit parameters of tested motor

Parameters	$R_1$	$X_m$	$R_m$	$R_2$	$X_2$
Computed values ( $\Omega$ )	6.25	180.39	18.029	10.217	13.759

Table 2 T type equivalent circuit parameters of tested motor

Parameters	$R_1$	$X_1$	$X_m$	$R_m$	$R_2$	$X_2$
Computed values ( $\Omega$ )	6.25	6.562	172.128	24.937	8.861	6.562

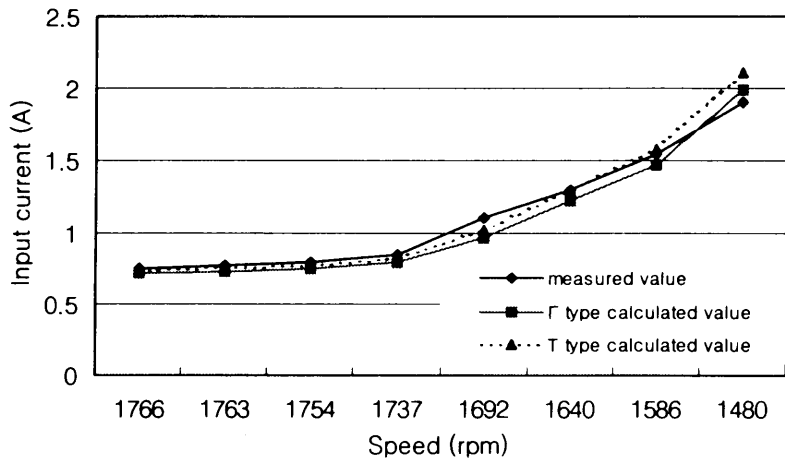
$\Gamma$ 형 등가회로와 T형 등가회로 그리고 Table 1과 Table 2의 회로정수를 사용하여 전압형 인버터전원에 의해 운전되는 유도전동기의 부하 변화에 따른 특성을 계산하였다. 부하 특성으로는 1차 입력전류, 입력 전력, 역률 그리고 토크를 적용하였다. 공시 전동기의 실부하 시험 결과와 계산한 결과를 Table 3, Table 4에 보였다. 그리고 Fig. 5의 (a)는 입력전류와 속도의 관계를, (b)는 입력 전력과 속도의 관계를, (c)는 역률과 속도의 관계를, (d)는 토크와 속도의 관계를 그래프로 나타내었다.

Table 3 Results of characteristics of tested induction motor (1)

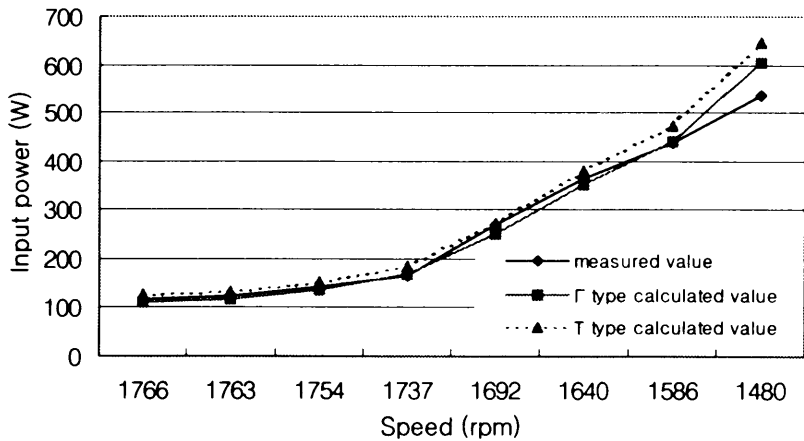
Speed (rpm)	Input current (A)			Input power (W)		
	Measured value	$\Gamma$ type calculated value	$T$ type calculated value	Measured value	$\Gamma$ type calculated value	$T$ type calculated value
1766	0.75	0.717	0.736	116	111.115	125.891
1763	0.77	0.725	0.754	124	118.011	133.247
1754	0.795	0.745	0.770	144	135.973	152.256
1737	0.845	0.789	0.824	164	167.138	185.161
1692	1.10	0.964	1.022	268	250.899	273.798
1640	1.30	1.218	1.298	364	350.976	379.326
1586	1.55	1.476	1.576	438	440.084	472.849
1480	1.90	1.986	2.114	536	606.247	645.222

Table 4 Results of characteristics of tested induction motor (2)

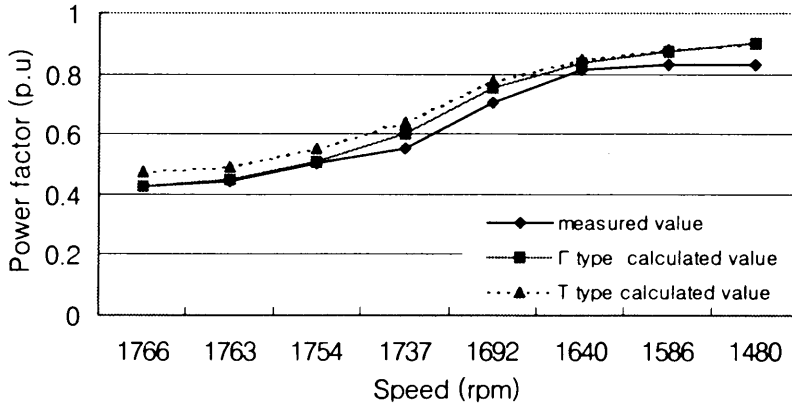
Speed (rpm)	Power factor (p.u)			Torque (N · m)		
	Measured value	$\Gamma$ type calculated value	$T$ type calculated value	Measured value	$\Gamma$ type calculated value	$T$ type calculated value
1766	0.427	0.428	0.473	0.10	0.415	0.442
1763	0.445	0.450	0.494	0.15	0.442	0.48
1754	0.505	0.509	0.551	0.25	0.546	0.582
1737	0.552	0.602	0.639	0.41	0.710	0.756
1692	0.707	0.755	0.778	0.81	1.131	1.201
1640	0.848	0.836	0.848	1.18	1.577	1.703
1586	0.880	0.874	0.880	1.46	2.019	2.128
1480	0.899	0.899	0.899	1.82	2.731	2.857



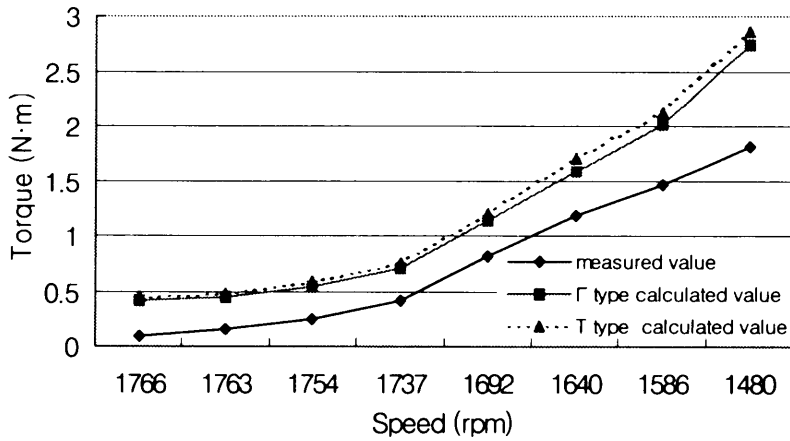
a) Input current vs speed



b) Input power vs speed



c) Power factor vs speed



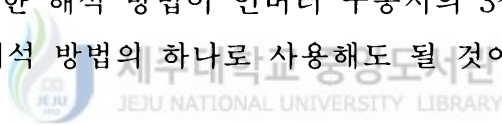
d) Torque vs speed

Fig. 5 Characteristics of induction motor driven by inverter source.

Fig. 5에서 보는 바와 같이  $\Gamma$ 형 등가회로에 의한 특성이 실측치와 T형 등가회로의 특성과 비교적 잘 일치하고 있다. 따라서 제안한  $\Gamma$ 형 등가회로 정수의 결정 방법은 인버터 전원에 의해 운전되는 유도 전동기의 정상 상태 특성 해석에 유용하게 활용할 수 있을 것이다.

## IV. 결론

인버터 전원에 의하여 구동되는 유도전동기의 정상상태 특성을  $\Gamma$ 형 등가회로를 사용하여 해석하였다. 등가회로 정수는 고정자 권선 직류저항 측정, 인버터 전원에 의한 정격주파수(60Hz) 무부하시험, 그리고 정격의 25% 주파수(15Hz) 구속시험 결과를 사용하였다. 보다 정확한 정수 결정을 위하여 단순화한 등가회로로부터 초기치를 구하고 무부하시험과 구속시험시의 등가회로로부터 얻어진 4개의 연립방정식을 풀어 고조파 성분의 영향을 고려한 회로정수를 구하였다. 이 회로 정수를 사용하여 인버터 전원으로 구동되는 3상 농형 유도전동기의 특성을 계산하고 기존의 T형 등가회로 방법 및 실측치와 비교하여 잘 일치함을 확인하였다. 따라서 제안한 해석 방법이 인버터 구동시의 3상 유도전동기의 정상상태 특성의 해석 방법의 하나로 사용해도 될 것이라고 기대한다.



## 참 고 문 헌

Ching-Yin Lee and Wei-Jen Lee, 1999, "Effects of Nonsinusoidal Voltage on the Operation Performance of a Three-phase Induction Motor," IEEE Transactions on Energy Conversion, Vol. 14, No. 2, pp. 193-202.

Tadao Fujimaki and Osamu Miyashita, 1984, "Method of Calculating The Characteristics of Squirrel-cage Induction Motor with Nonsinusoidal Voltage Source," J.I.E.E.J, Vol. 104, No. 7, pp. 401-408.

L. A. Doggett and E. R. Queer, 1929, "Induction Motor Operation with Nonsinusoidal Impressed Voltages," Transactions A.I.E.E, Vol. 48, pp. 1217-1220.

G. C. Jain, 1964, "The Effect of Voltage Wave shape on the Performance of a 3-phase Induction Motor," IEEE Transactions on Power apparatus & systems, Vol. 48, pp. 561-568.

Eugene A. Klingshirn and Howard E. Jordan, 1968, "Polyphase Induction Motor Performance and Losses on Nonsinusoidal Voltage Source," IEEE Transactions on Power apparatus & systems, Vol. PAS-87, No. 3, pp. 624-631.

A. Ishizaki and K. Hirayama, 1967, "Precise Determination of Equivalent Circuit Parameters for Performance Calculation of Polyphase Induction machines," J.I.E.E.J, Vol. 87-1, No. 940, pp. 173-

180.

Gorden R. Slemon, 1989, "Modelling of Induction Machines for Electric Drives," IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 25, No. 6, pp.1126-1131.

山村 昌, 1988"交流モータ 解析と制御," オーム社, pp.16-29.

A. Gastli, 1999, "Identification of Induction Motor Equivalent Circuit Parameters using the Single Phase Test," IEEE Transactions on Energy Conversion, Vol. 14, No. 1, pp. 51-56.

Hatayashi Yamada, Hiroaki Nagashima, Yukihiro Sakashita and Kouki Matsusa, 1983, "Characteristics by Inverter Source Test of Induction Motor," J.I.E.E.J, Vol. 103, No. 5, pp. 375.



## 감사의 글

잠깐 생각해 보면 엇그제 같은데 벌써 2년 반이 흘렀습니다. 그 동안 힘들고 어려운 날들도 많았지만, 제 자신에게는 또 다른 배움의 기회를 갖게 된 것을 무엇보다 큰 기쁨으로 생각합니다. 게으름과 무지의 저를 여기까지 이끌어주신 모든 분들께 감사의 글을 전하며, 앞으로 더욱 더 삶에 열정을 갖고 생활하고자 합니다.

항상 성실하고 책임감 있게 저를 지도해주신 좌종근 교수님께 머리 숙여 감사드리며, 대학원 과정에 있어 많은 조언과 가르침을 주신 오성보 교수님, 이개명 교수님, 김세호 교수님, 김호찬 교수님, 김일환 교수님께도 깊은 감사의 마음을 표하고자 합니다.

그리고, 전기 기기 연구실에서 많은 도움을 주고 먼저 졸업을 한 김재민 선생님, 홍문석, 진충민 원생, 지금 이 순간 연구실에서 항상 열심히 노력을 하고 있는 정재훈, 현응탁, 이정호, 김도진 원생에게도 고마움을 표시합니다. 그리고, 힘들 때마다 고민과 걱정을 함께 나누어주신 졸업 선배님 및 산업 대학원 동기 여러분, 진우회와 친구 김관용, 양원석에게도 지면으로나마 감사하게 생각합니다. 또한, 항상 동고동락을 같이 하는 회사 동료들에게도 이 기쁨을 같이 하고자 합니다.

끝으로, 항상 제 곁에 제서서 희망이 되어주시는 부모님에게 이 논문을 바치며, 미래를 함께 할 동반자인 사랑하는 진영씨와 짝으나마 저를 걱정해주시는 장인, 장모님, 그리고 처가집 식구들에게 감사드립니다.

2001년 7월