

# 인버터구동시 농형 유도전동기의 파라메타 추정

강세형, 안종보, 김근웅\*, 김영관  
이천전기 중앙연구소

## Parameter estimation of the inverter-driven squirrel cage induction motor

Kang Sei-Hyung, Ahn Jong-Bo, Kim Keun-Woong\*, Kim Young-Kwan  
Leechun Electric MFG Co., R&D Institute

### Abstract

When the inverter driven induction motor is compared with sinusoidal voltage driving, the loss is increased and efficiency in the same output is decreased by the time harmonics in inverter output.

These are based on the eddy current on stator and the skin effects of rotor bar current induced from time harmonic. The aim of this paper is to estimate the equivalent circuit parameter of squirrel cage induction motor fed from inverter considering this effects.

### 1. 서론

인버터에 의한 유도전동기의 가변속운전은 성에나지, 정보수등의 장점으로 가전제품에서 산업용의 대용량까지 광범위하게 이용되어지고 있다.

특히 지하철 차량의 경우 터널건설비를 저감하는 목적에서 저장식 소형전동차가 요구되므로 주전동기와 동시에 차량의 소형화가 가능한 인버터에 의한 유도전동기 구동시스템방식이 실용화되고 있다.[1]

그러나, 인버터로 구동한 경우의 전동기는 인버터 출력중에 포함된 시간조파성분에 의해서 정현파 구동시와 비교하여 손실이 증가하고 동일출력에의 효율이 저하한다.

이런 주된 요인은 시간조파에 의한[2]

- 1) 1차 동손 및 고정자 철심에 생기는 와전류에 의한 철손의 증가
- 2) slot중의 도체전류의 포피효과에 의한 2차 동손의 증가

이며, 특히 2차 도체중의 포피효과에 의한 손실이 현저하다.

이러한 왜형파 구동시의 유도기의 실용적인 고정도 특성산정법의 확립이 중요하다.

그러므로, 본 논문에서는 특수 농형 유도전동기를 대상으로

- 1) 1차측에 있어서는 고정자 철심의 와전류
- 2) 2차측에 있어서는 슬롯중의 도체전류의 포피효과

의 영향을 고려한 등가회로 및 그 정수결정법을 이용하여 인버터 구동시의 왜형파에 의한 전동기의 특성을 정확히 산정하고자 한다.

### 2. 등가회로

왜형파에 대해 유도전동기의 특성산정을 위한 등가회로는 상용주파수 구동시의 유도전동기의 특성산정법으로 광범위하게 이용되는 T형 등가회로를 기초로 고정자 철심의 와전류 및 회전자 도체전류의 포피효과를 고려한 방법에 의해 구성된다.

#### 2.1 철심의 와전류를 고려한 고정자 등가회로

일반적으로 주파수가 높게 되면 실효저항이 실측치와 맞지않는 경향이 두드러지며 이 요인은 와전류회로는 실제에는 대단히 복잡하게 분포하는 것에도 불구하고 이것을 유한개의 RL 집중정수회로로 근사하여 산정하기 때문에 와전류특성이 등가회로상에 잘 가미되지 않는 것으로 사료된다.[3]

그러므로 본 논문에서는 유도전동기가 동기속도로 회전할때 와전류 특성을 분포정수 회로로 고려하여, 이를 포함한 고정자 한상분의 등가회로로 구성하면 그림 1로서 표현된다. 단, 자기 히스테리시스는 무시한다.

그림 1에서 단자 ab에서 보는 가상와전류 회로의 임피던스는 (1)식과 같다.

$$Z_0 = \frac{V_0(o,t)}{i_0(o,t)} = \sqrt{j\omega L_0/G_0} \quad (1)$$

가상와전류 회로(임피던스  $Z_0$ )를 고려한 그림 1의 등가회로에서 고정자 임피던스는 다음에 의

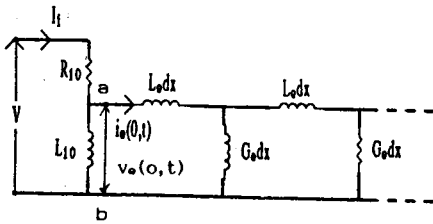


그림 1. 와전류를 고려한 고정자 등가회로

한다.

$$\frac{V}{I_1} = R_{10} + \frac{j\omega L_{10}}{1 + j\omega T_0} = R_1 + j\omega L_1 \quad (2)$$

$$\sqrt{T_0} = L_{10} \sqrt{\frac{G_0}{L_0}}$$

여기서 V : 무부하시험에의 전압

I<sub>1</sub> : 무부하시험에의 전류

ω : 각 주파수

R<sub>10</sub> : 고정자 권선의 직류저항

T<sub>0</sub> : 가상와전류 회로의 시정수

(2)식을 정리하면 고정자 실효저항 R<sub>1</sub> 및 실효 인덕턴스 L<sub>1</sub>은 각각 (3), (4)식에 의한다.

$$R_1(\omega) = R_{10} + \frac{L_{10}\omega\sqrt{\omega T_0}/2}{1 + \omega T_0 + \sqrt{2\omega T_0}} \quad (3)$$

$$L_1(\omega) = L_{10} - \frac{L_{10}(\omega T_0 + \sqrt{\omega T_0}/2)}{1 + \omega T_0 + \sqrt{2\omega T_0}} \quad (4)$$

(3)식의 우변 제2항은 와전류에 의한 저항의 증가분이고 (4)식의 우변 제2항은 인덕턴스의 감소분을 나타낸다. (3) 및 (4)식을 연립하여 풀고 무부하시험에서 임피던스법에 의해 R<sub>1</sub>과 X<sub>1</sub>를 구하면 고정자 권선의 인덕턴스 L<sub>10</sub>과 와전류의 정도를 표현하는 척도 T<sub>0</sub>는 다음식에 의해서 구해진다.

$$L_{10} = \frac{X_1^2 + (R_1 - R_{10})^2}{\omega(X_1 - (R_1 - R_{10}))} \quad (5)$$

$$T_0 = \frac{2}{\omega} \left\{ \frac{R_1 - R_{10}}{X_1 - (R_1 - R_{10})} \right\}^2 \quad (6)$$

여기서 X<sub>1</sub> = ωL<sub>1</sub>

(3)식에서 와전류에 의한 저항의 증가분을 별도로 R<sub>m</sub>(ω)으로 표현하면 (7)식과 같이 된다.

$$R_m(\omega) = \frac{L_{10}\omega\sqrt{\omega T_0}/2}{1 + \omega T_0 + \sqrt{2\omega T_0}} \quad (7)$$

위 수식에서 그림 1의 등가회로를 그림 2로 표현이 가능하다.

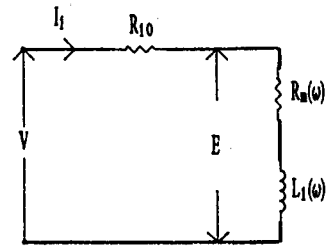


그림 2. 고정자 등가회로

2.2 전류의 포비효과를 고려한 회전자 등가회로  
심구형, 2중농형에 있어서 슬롯중에 도체전류의 포비효과에 의해 실효저항은 증가하고 실효인덕턴스는 감소한다.

이러한 전류의 포비효과를 가능한 정확히 표현하고 그 회로정수의 결정을 용이하게 하기위해서 2.1절에 서술한 철심중의 와전류와 상이하다고 간주하여 회전자 등가회로를 구성하면 그림 3과 같다.

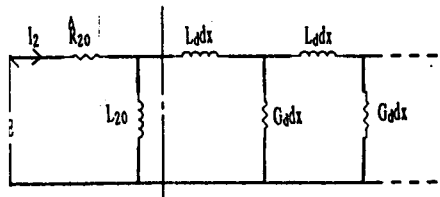


그림 3. 포비효과를 고려한 회전자 등가회로

여기서 R̂<sub>20</sub> : 회전자권선의 직류저항

L<sub>20</sub> : 회전자권선의 인덕턴스

L<sub>d</sub> : 가상포비효과의 단위장 인덕턴스

G<sub>d</sub> : 가상포비효과의 단위장 콘덕턴스

이고, 모두 1차 환산치이다.

(3)식과 마찬가지로 가상포비효과 회로의 임피던스는

$$Z_d = \sqrt{j\omega L_d / G_d} \quad (8)$$

가 되고 2.1결과 같은 양상으로

정격주파수의 구속시험에 의해 회전자권선의 인덕턴스 L<sub>20</sub>과 전류의 포비효과를 나타내는 척도 T<sub>d</sub>를 다음식에 의하여 구한다.

$$L_{20} = \frac{X_2^2 + (R_2 - \hat{R}_{20})^2}{\omega(X_2 - (R_2 - \hat{R}_{20}))} \quad (9)$$

$$T_d = \frac{2}{\omega} \left[ \frac{R_2 - \hat{R}_{20}}{X_2 - (R_2 - \hat{R}_{20})} \right]^2 \quad (10)$$

여기서 R<sub>2</sub>, X<sub>2</sub>는 구속시험의 임피던스 시험에서 구한 값이고 R̂<sub>20</sub>은 회전자의 직류저항이다.

특수농형에는 도체중의 포비효과때문에 주파수에 대한 실효저항의 증가가 보통농형에 비해 현저하

기 때문에  $\hat{R}_{20}$ 의 추정은 어려운 문제이다. 여기에서는 JEC-37의 특수능형의 운전시의 저항을 구한 방법을 이용한다. 즉 주파수에 대한 2차저항의 특성을 정격주파수 및 그의 1/2의 주파수에 대한 임피던스 시험에서 각각의 2차저항  $R_2$ 를 구해 그 2점을 연결한 직선을 연장하여 그 직선상의 1/5 주파수의 점을 얻어 이것을 직류저항  $\hat{R}_{20}$ 이라 간주한다.

동기회로정수  $R_2(\tilde{\omega})$ ,  $L_2(\tilde{\omega})$ 는 다음식으로 표현된다.

$$R_2(\tilde{\omega}) = \hat{R}_{20} + \frac{L_{20}\tilde{\omega}\sqrt{\tilde{\omega}T_d/2}}{1+\tilde{\omega}T_d+\sqrt{2\tilde{\omega}T_d}} \quad (11)$$

$$L_2(\tilde{\omega}) = L_{20} - \frac{L_{20}(\tilde{\omega}T_d+\sqrt{\tilde{\omega}T_d/2})}{1+\tilde{\omega}T_d+\sqrt{2\tilde{\omega}T_d}} \quad (12)$$

(8)식과 (9)식에 의해 그림 3의 동기회로는 그림 4로 표현된다.

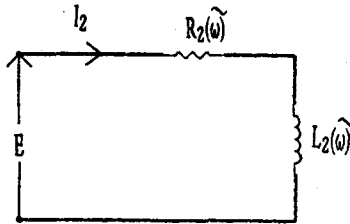


그림 4. 회전자 동기회로

그림 2 및 그림 4의 동기회로부터 일반적으로 Slip S에 대해 3상 유도전동기의 상당 동기회로는 그림 5에 의해 표현된다.

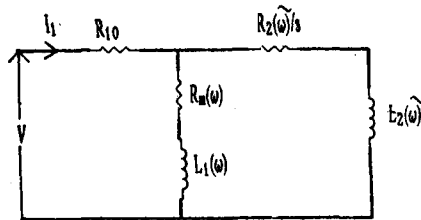


그림 5. 유도전동기의 동기회로

### 3. 동기회로 Parameter 결정

그림 5의 동기회로의 Parameter는 고정자 권선저항의 측정, 무부하 및 정격과 1/2주파수에 의한 구속시험에서 구한다.

- (1)  $R_{10}$ 의 결정 : 고정자 권선저항 측정
- (2)  $R_m$  및  $L_1$ 의 결정 : 정격주파수에 대해 무부하시험시의 전압, 전류 및 입력을 측정하여 임피던스를 구하

고  $L_{10}$ ,  $T_e$ 를 산정하여 (4)식과 (7)식에 대입하여 구한다.

(3)  $R_2$  및  $L_2$ 의 결정 : 정격과 1/2의 주파수에 의한 구속시험을 행하고, 무부하시험에서 정격의 60~70%의 전압을 가해 구한  $R_m$ 과  $L_1$ 의 미포화치를 이용하여 결정한다.

## 4. 산정결과

### 4.1 시험기사항

시험기는 표 1에 표시한 5.5KW 특수 능형유도기이다.

표 1. 전동기 정격과 정수

<p>정격 : 5.5KW, 4극 60Hz 380V 12A 1753rpm</p> $R_m(\omega) = \frac{L_{10}\omega\sqrt{\omega T_e/2}}{1+\omega T_e+\sqrt{2\omega T_e}}$ $L_{10}(\omega) = L_{10} - \frac{L_{10}(\omega T_e+\sqrt{\omega T_e/2})}{1+\omega T_e+\sqrt{2\omega T_e}}$ $R_2(\tilde{\omega}) = \hat{R}_{20} + \frac{L_{20}\tilde{\omega}\sqrt{\tilde{\omega}T_d/2}}{1+\tilde{\omega}T_d+\sqrt{2\tilde{\omega}T_d}}$ $L_2(\tilde{\omega}) = L_{20} - \frac{L_{20}(\tilde{\omega}T_d+\sqrt{\tilde{\omega}T_d/2})}{(1+\tilde{\omega}T_d+\sqrt{2\tilde{\omega}T_d})}$ <p>(<math>\tilde{\omega} = s\omega</math>)</p>
-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

### 4.2 동기회로 정수의 주파수 특성

그림 6은 와전류 효과를 고려한 고정자 동기회로에서 정현파 전원을 이용한 무부하 시험을 행하여 산정한  $R_1$ 과  $L_1$ 의 주파수 변화에 따른 추정치를 나타낸 곡선이다.

그림 7은 Slot중의 도체전류의 포피효과를 고려한 2차정수  $R_2$ 와  $L_2$ 의 주파수 특성을 나타내었다.

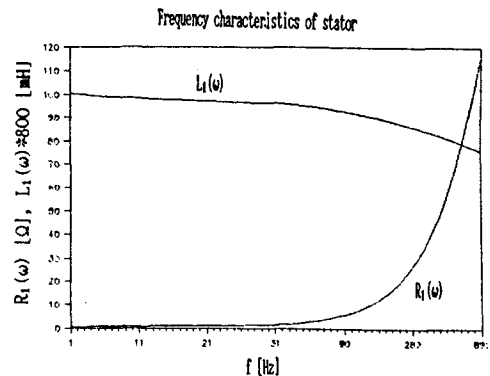


그림 6. 고정자 파라메타의 주파수 특성

표 2는 59차까지의 고조파를 고려했을 때 각조파별 1차 2차 정수분 나타낸 표이다.

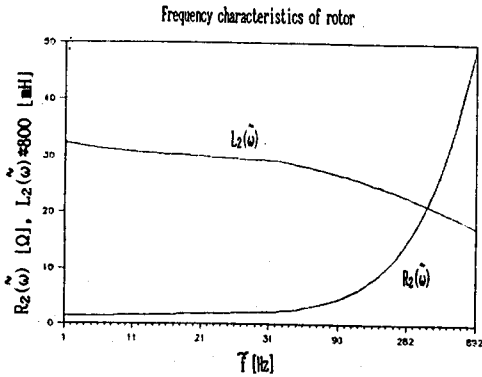


그림 7. 회전자 파라메타의 주파수 특성

5. 결론

본 논문에서는 고정자철심의 와전류 및 회전자전류의 포비효과와 영향을 등가회로 정수에 가미하여 왜형파 구동시 시간고조파에 의한 정수변화율 추정하였다.

그 결과 특수 농형에 대해 도체전류의 포비효과에 의한 2차 실효저항의 현저한 증가와 2차 인덕턴스의 감소를 잘 나타내 주고 있다.

앞으로 인버터 구동시 실제 측정값으로부터 이본치의 보편타당함을 입증한다면 간단한 정현파에 의한 시험을 통하여 인버터 구동시 유도전동기 특성을 고정도로 산정할수 있다.

또한 전동기내의 정수변동의 추정가능으로 슬립주파수제어형 벡터제어의 새로운 지침이 되리라 본다.

참고 문헌

1. 柳田啓一郎, 木島研二, "車輛用誘導電動機駆動用 GTO 인'버'타裝置", TOSHIBA REVIEW, VOL.36, NO.9, 1981
2. 藤卷忠雄, "ひずみ波駆動時におけるかご形誘導電動機の特性算定法", 電氣學會論文誌, 104卷, 7號, 1984
3. 三木一郎, 松瀬貞規, "磁氣飽和を考慮した誘導電動機の等價回路定數決定の一手法", 電氣學會論文誌, 98卷, 6號, 1978
4. 宮下收, 藤卷忠雄, "直流機の實效インダクタンスおよび實效抵抗の簡易推定法", 電氣學會論文誌, 103卷, 1號, 1983
5. "6ステップ形インバータの誘導電動機の特性に及ぼす影響", 電氣學會技術報告(1部), 第135號

표 2. 각 조파별 전동기 파라메타 (f1=60Hz시)

n	f[Hz]	slip	R1(ω)	L1(ω)	R2(ω)	L2(ω)
1	60.00	0.0262	3.71803	0.11787	1.38357	0.04032
5	300.00	1.1948	28.75017	0.10728	19.09447	0.02715
7	420.00	0.8609	44.59837	0.10397	19.27375	0.02710
11	660.00	1.0885	79.65112	0.09881	39.65673	0.02316
13	780.00	0.9251	98.30602	0.09668	39.83379	0.02313
17	1020.00	1.0573	137.08890	0.09303	59.52870	0.02071
19	1140.00	0.9487	157.02110	0.09142	59.69785	0.02069
23	1380.00	1.0423	197.63319	0.08855	78.46504	0.01896
25	1500.00	0.9610	218.21867	0.08725	78.62608	0.01895
29	1740.00	1.0336	259.77420	0.08487	96.50628	0.01763
31	1860.00	0.9686	280.69186	0.08378	96.65989	0.01762
35	2100.00	1.0278	322.70575	0.08175	113.73947	0.01656
37	2220.00	0.9737	343.77036	0.08081	113.88642	0.01655
41	2460.00	1.0238	385.95233	0.07904	130.25191	0.01567
43	2580.00	0.9774	407.04968	0.07821	130.39294	0.01567
47	2820.00	1.0207	449.21649	0.07665	146.12123	0.01492
49	2940.00	0.9801	470.27289	0.07591	146.25696	0.01492
53	3180.00	1.0184	512.30481	0.07450	161.41423	0.01428
55	3300.00	0.9823	533.27155	0.07384	161.54520	0.01427