

# 구속 시험에 의한 선형 유도 전동기의 등가회로 및 특성계산

\*김 규 탁, \*강 규 홍, \*최 태 희, \*이 정 규  
\* 창원대학교 전기공학과

## EQUIVALENT CIRCUIT AND CHARACTERISTICS CALCULATION OF LIM BY THE LOCK TEST

\*Gyu-Tak Kim, \*Gyu-Hong Kang, \*Tae-Hee Choi, \*Jung-Gyu Lee  
\* Dept. of Electrical Engineering, Chang-Won Nat'l Univ.

### ABSTRACT

In this paper, we proposed a new method which does not need no load test for the characteristics analysis of linear induction motor. A new equivalent circuit of LIM is chosen and a method of determining its constants from results of the lock test is discussed.

The calculated results were satisfactorily agreed with experimental results and conventional method.

### 1. 서 론

선형 유도 전동기(LIM)의 특성 해석을 등가 회로법에 의하여 행하는 경우, 지금까지는 회전형 유도 전동기(IM)의 해석에 널리 이용되고 있는 T형 등가 회로를 이용하며, 이때의 각 회로 정수는 철손을 무시한 상태에서 해석적인 방법이나, 각종 시험을 통하여 산정하고 있다[1-4].

그러나, LIM은 그 구조상 무부하 시험이 곤란하며 이를 행하기 위하여는 특수한 장치가 필요하다. 또한, 공극이 매우 커 구속 시험시의 전압이 정격전압에 가까워 여자 전류의 영향 및 철손을 무시할 수 없으며 2차측의 회로정수가 표피효과의 영향으로 변화하는 등 기존의 등가 회로에 의한 특성 계산은 많은 문제점이 존재하므로 회전형 전동기의 등가 회로 산정법과는 다른 간단하고도 정확한 산정법이 요구되고 있다.

이에 따라, 회전형 전동기의 회로정수 산정법과 같은 각종 시험에 의한 선형 유도 전동기의 회로정수 산정에 관한 연구가 활발히 진행되고 있다[3, 4]. 그러나, 이들 방법은 회로정수중 분리가 곤란한 1, 2차 누설 리액턴스를 분배계수에 의해 분리하는 방법으로 주파수 및 2차 도체판의 두께, 공극장의 길이 등에 따라 분배계수를 달리하거나 특수 장치에 의하여 무부하 시험을 행하고 여러 주파수에서의 구속 시험 결과를 토대로 회로 정수를 산정하는 등 많은 문제점이 존재한다.

따라서, 본 연구에서는 반송 시스템의 구동용 LIM과 같이 단부효과를 무시할 수 있는 저속의 선형 유도 전동기를 대상으로 권선 저항 측정과 구속 시험 결과로부터 특성을 계산하는 새로운 특성 산정법을 제안하였다.

본 연구의 타당성을 입증하기 위하여 산정된 정수로 부터 시동 특성을 계산하여 실험치 및 해석적인 방법의 결과와 비교, 검토하였다.

### 2. 시험장치 및 특성 실험

본 연구에 사용된 시험기는 반송 시스템의 구동용 선형 유도 전동기와 같이 단부 효과를 무시할 수 있는 편축식 선형 유도 전동기로 그림 2.1에 나타내었으며 그 제원은 표 2.1과 같다.

구속시의 발생 추력을 측정하기 위하여 Load cell을 장착

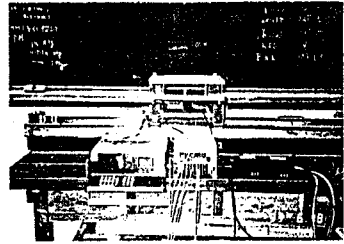


그림 2.1 실험 장치

하였으며, 이때의 입력은 3상 watt meter로 측정하였다. 한편, 1차측의 권선 저항은 구속시험 후 직류전류 및 Digital RLC Meter(Model명: MODEL2150, (주) Electro Scientific Industries Inc.)로 측정하였으며 구속시험시의 전압가변은 유도 전압 조정기를 이용하였다.

표 2.1. 시험기의 사양

출력 - 극수	300W-4P	슬롯 폭	7.5 mm
전압 - 주파수	220V-60Hz	슬롯 길이	40 mm
동기 속도	8.28 m/s	공극	2.5 mm
정격 속도	3 m/s	1 차 권선	
정격 전류	5.5 A	단 절을	5/6
1 차 철심	상당직렬권선	480	
철심 길이	338 mm	도체수 / 슬롯	120
철심 적층폭	80 mm	2 차 측	
극 간 격	69 mm	두께	3 mm
슬롯수/극, 상	2	폭	134 mm
슬롯 피치	11.5 mm	2차철판 두께	10 mm

그림 2.2는 60Hz인 경우 시험기의 등가 무부하 시험결과이다. 편축식 선형 유도 전동기는 공극의 가변이 용이하며 2차도체판을 제거할 수 있다. 여기서 등가 무부하 시험이란 2차측이 Back iron만으로 구성된 경우의 실험으로 2차측에 흐르는 전류가 거의 없었으며 이는 발생추력으로 부터 확인할 수 있었다. 따라서, 2차측을 제거하고 구속시험을 행하면 무부하시의 회로정수를 구할 수 있으며 실오상 큰 오차는 발생하지 않는다.

그림 2.2에서 알 수 있는바와 같이 전압과 전류는 비례관계에 있으며 자기적인 포화의 영향을 거의 나타나지 않았다. 즉, 소용량의 선형 유도 전동기에서는 일반적으로 회전형 유도기의 회로 정수에 비해 여자 리액턴스가 작으며, 자기적 포화 현상이 전류를 비롯한 제특성에 미치는 영향이 작음을 알았다. 따라서, 본 논문의 주제인 구속 시험으로

부터 등가회로의 정수를 구하여 특성을 산정하는 경우, 구속 시험이 정격전압보다 낮은 전압에서 행하여도 정격전압에서의 특성 산정에 충분히 이용할 수 있다.

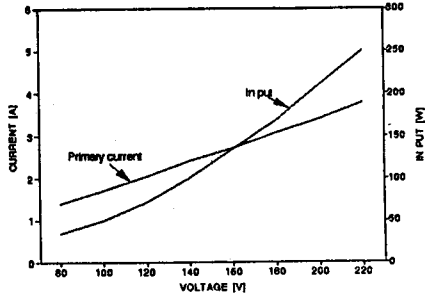


그림 2.2 등가 무부하 시험

정격전압  $V_1$  일 때의 1차 전류를  $I_o$ , 입력은  $W_o$ 라고 하면, 1차 리액턴스  $X_1$  과 등가 철손 저항  $R_m$ 은 다음식으로 계산된다.

$$X_1 = (R_n^2 + X_n^2) / X_n \quad (1)$$

$$R_m = (R_n^2 + X_n^2) / R_n \quad (2)$$

$$R_n = \frac{W_o}{3I_o^2} - R_1 \quad (3)$$

$$X_n = \sqrt{\left(\frac{V_1}{\sqrt{3}I_o}\right)^2 - \left(\frac{W_o}{3I_o^2}\right)^2}$$

여기서,  $X_1$ 과  $R_m$ 은 그림 3.1에 나타난 등가회로의 회로정수이며  $X_1$ 은 1차 누설 리액턴스와 여자 리액턴스를 합한 값이다( $X_1 = x_1 + X_m$ ). 등가 무부하 시험 결과로부터 얻은 선형 유도 전동기의 회로 정수는 표 2.2에 나타내었다.

표 2.2 등가 무부하 시험에 의한 회로 정수

1차 권선 저항	$R_1 = 2.8 \Omega$
등가 1차 리액턴스	$X_1 = 33.46 \Omega$ (60Hz)
등가 철손 저항	$R_m = 362.4 \Omega$ (60Hz)

그림 2.3은 구속 시험 결과로써 철손의 영향을 고찰하기 위하여 입력 전압을 90[V]에서 정격전류가 흐르는 190[V]까지 가변하여 나타내었으며 측정 데이터는 전압, 전류, 입력, 추력이다.

일반적으로 구속시험에서는 인가 전압이 정격 전압에 비해 매우 낮으므로 철손을 무시하고 1차 입력으로부터 1차 동손분을 뺀 나머지가 2차 동손이 된다. 그러나, LIM의 경우에는 등가 공극이 매우 크므로 구속 시험시의 전압이 정격 전압에 가깝게 되고 철손도 무시할 수 없다. 또, 시간적 고조파 또는 단부효과등의 영향에 의하여 표유손의 증가가 예상된다. 따라서 추력 발생에 유효하게 작용하는 2차 입력을 구하기 위하여 추력을 측정하였다. 추력을 구함으로써 동기 속도와의 관계로부터 2차 입력을 구할 수 있다.

$$P_{L2} = T_L \cdot V_s \quad (4)$$

구속시험에는 2차 입력이 모두 2차 동손이 되므로 이 값을 이용하면 구속 시험시의 철손, 표유손등은 분리할 수 있으며 회로 정수의 산출 정도를 향상시킬 수 있다. 그림 2.3에 앞의 데이터에 의하여 손실을 분류하기 위하여 1차 입력에서 1차 동손을 뺀 선을 유추하였다. 이 결과 1차 입력에는 1차 및 2차 동손외에 약 4[%]의 부가적인 손실이 포함되어 있음을 알 수 있다. 이 부가적인 손실이 등가 철손이다.

그림 3.2의 특성해석을 위한 철손저항은 구속시험 결과 352.4[Ω]로 등가 무부하 시험시의 2.8[x]의 오차로 만족스러운 결과를 얻었다.

이상의 결과로부터 구속 시험에 의한 LIM의 등가 철손은 2차 동손에 비하여 무시할 수 없으며 추력에 기여하는 2차 유효 입력과 등가 철손을 분류하는 것은 중요하리라 생각된다.

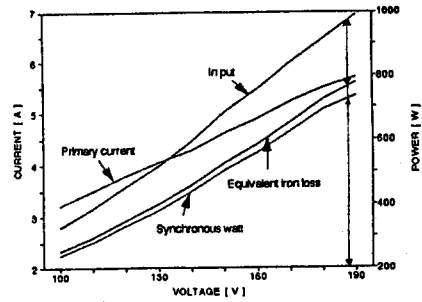


그림 2.3 구속 시험

### 3. 등가 회로 선정과 회로 정수 결정

회전형 전동기의 특성 산정에는 일반적으로 T형 등가 회로를 이용하며 이때의 정수 결정법도 확립되어 있다. 그러나, 무부하 시험이 반드시 필요하며, 1차 및 2차 누설 리액턴스의 정밀한 분리가 곤란하고 선형 유도 전동기처럼 표피효과에 의하여 2차 정수가 변화하는 경우에는 적절한 방법이 되지 못한다. 또, 등가 공극이 회전형에 비하여 상대적으로 큰 선형 유도 전동기의 경우에는 구속시에도 여자 전류가 상당량 흐르고 있는 등 T형 등가회로를 선형 유도 전동기에 곧바로 적용하기에는 문제점이 많다.

따라서, 본 연구에서는 선형 유도 전동기의 특성을 구속 시험만의 결과로부터 산정하기 위하여 그림 3.1과 같은  $\pi$ 형 등가 회로를 도입하였다.

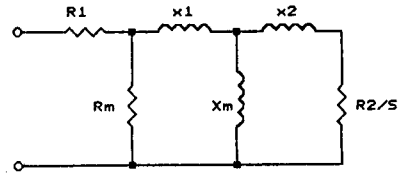


그림 3.1  $\pi$ 형 등가 회로

그림 3.1의  $\pi$ 형 등가 회로는 철손 저항의 산출을 용이하게 하기 위하여 1차 저항 직후에 철손 저항을 삽입하였으며  $R_1$ : 1차 저항,  $x_1$ : 1차 누설 리액턴스,  $X_m$ : 여자 리액턴스,  $R_2$ : 2차 저항,  $x_2$ : 2차 누설 리액턴스,  $R_m$ : 등가 철손 저항, s: 슬립이다.

앞에서 설명한 바와 같이 구속 시험에서 추력을 측정하여 등가 철손을 분리하여야 하므로 등가 회로에서 철손 저항의 취급이 용이한 형태로 변형한 회로가 그림 3.2이다.

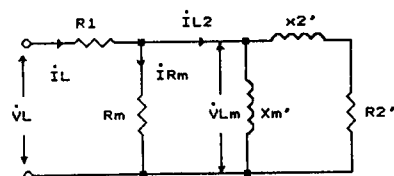


그림 3.2 LIM 특성 산정을 위한 등가 회로

그림 3.2에서

$$\begin{aligned} X_m' &= \alpha \cdot X_m = X_1 \\ x_2' &= \alpha \cdot X_2 - \alpha \cdot X_m \\ R_2' &= \alpha^2 \cdot R_2 \end{aligned} \quad (5)$$

이며,  $\alpha = X_1/X_m$ ,  $X_1$ : 1차 리액턴스( $X_1 = x_1 + X_m$ ),  $X_2$ : 2차 리액턴스( $= x_2 + X_m$ )이다. 그리고,  $X_m'$ 는 표 2.2의  $X_1$ 과 동일하다.

따라서, 그림 3.2의 등가 회로를 이용하면 1차 및 2차 누설 리액턴스를 분리할 필요가 없으며, 정수의 산출이 용이하여 무부하 시험을 행하지 않는 본 산정법에 적합한 등가 회로이다.

한편, 구속 시험시의 상전압은  $V_L$ , 전류는  $I_L$ , 입력은  $W_L$ , 추력은  $T_L$ 이라 하면 특성 산정은 다음과 같다.

(1) 전원측에서 본 전체 저항  $R_L = W_L / (3I_L^2)$  (6)

(2) 전원측에서 본 전체 리액턴스

$$X_L = \sqrt{(V_L / I_L)^2 - R_L^2} \quad (7)$$

(3) 1차 전류  $I_L = V_L / (R_L + jX_L)$  (8)

(4) 여기전력  $V_{Lm} = V_L - R_L I_L$  (9)

(5) 2차 입력  $P_{L2} = T_L - V_s$  (10)

(6) 등가 철손  $W_{Lm} = W_L - 3R_L I_L^2 - P_{L2}$  (11)

(7) 등가 철손 저항  $R_m = 3V_{Lm}^2 / W_{Lm}$  (12)

(8) 철손 전류  $I_{Rm} = V_{Lm} / R_m$  (13)

(9) 등가2차전류  $I_{L2} = I_L - I_{Rm}$  (14)

(10) 등가 2차 임피던스

$$Z_{2E}(s=1) = R_{2E}(s=1) + jX_{2E}(s=1) \quad (15)$$

여기에서,

$$R_{2E}(s=1) = P_{L2} / (3I_{L2}^2) \quad (16)$$

$$X_{2E}(s=1) = \sqrt{(V_{Lm}/I_{L2})^2 - (R_{2E}(s=1))^2} \quad (17)$$

이다. 여기서 등가 2차 전류는 여자 전류와 2차 전류의 합으로 나타나며, 등가 2차 임피던스는  $X_m'$ 를 포함한 2차측의 전체 임피던스를 나타낸다.

한편, 임의의 슬립 S에 있어서의 등가 2차 임피던스를 그림 3.2의 등가 회로에 의해 구하기 위하여 저항분을  $R_{2E}(s)$ , 리액턴스를  $X_{2E}(s)$ 라 하면 2차 정수  $R_2'$  및  $x_2'$ 는 양식의 관계로 부터 다음식으로 주어진다.

$$\frac{R_2'}{s} = \frac{R_{2E}(s)X_m'}{(R_{2E}(s))^2 + (X_{2E}(s) - X_m')^2} \quad (18)$$

$$x_2' = \frac{X_m' [X_{2E}(s)X_m' - Z_{2E}(s)]}{(R_{2E}(s))^2 + (X_{2E}(s) - X_m')^2} \quad (19)$$

#### 4. 해석 결과 및 검토

그림 4.1은 기동시 입력전압의 변화에 따른 발생추력, 입력전류의 변화를 기존방법 및 실험치와 비교하여 나타내었다[1,2]. 전압이 낮은 경우는 실험치 및 기존 방법에 의한 결과와 매우 잘 일치하였으나 전압이 상승할수록 실험치와 다소 큰 오차를 발생하였다. 이는 전압이 상승할수록 1차 권선 및 2차 도체판의 온도상승에 의한 권선저항의 증가로 입력전류가 감소하였기 때문이다. 한편, 입력전류의 산정에서는 기존방식이 본 연구에서 제안한 방식 및 실험치보다 적게 나타났다. 이는 기존방식에서는 철손을 무시하고 계산하므로 철손분 전류가 누락되었기 때문이며 전압이 상승할 수록 그 오차는 크게 나타났다. 한편 역률계산에서는 기존방식이 60.5[%]로 크게 나타났으며 본 방식이 55.2[%], 실험치가 52.85[%]로 나타났다. 전압상승에 따라 오차가 다소 크게 발생한 것은 입력전류의 증가에 따른 저항 증가, 추력측정시의 가이드 레일의 마찰력, 측정시의 계기 및 눈금오차등에 기인한 것으로 측정장비의 디지털화 및 고속화가 이루어지면 이와 같은 오차는 해소되리라 사료된다.

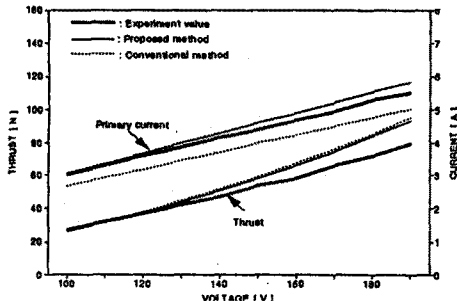


그림 4.1 전압에 따른 추력, 입력전류

그림 4.2는 Maxwell전자 방식식에 의해 회로 정수를 산출

하는 기존 방법[1,2]과 본 연구에서 제안한 방법에 의한 특성 해석시의 슬립에 따른 등가 2차 정수의 변화를 나타낸 것이다. 등가 2차 정수는 본 연구에서의 회로 정수 값을 기존의 T형 등가회로로 변환시의 값이다. 그림에서 알 수 있는 바와 같이 그 변화의 양상은 같았으며 본 연구에서 제안한 방법이 기존 방법에 의한 값보다 다소 작게 나타났다. 이는 철손분 저항을 2차측에 병렬로 삽입하였기 때문이라 사료된다.

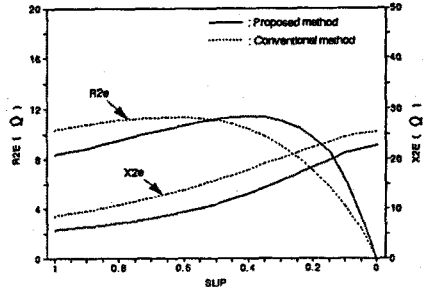


그림 4.2 슬립 변화에 따른 등가 2차 정수

입력전압 220[V]시, 슬립변화에 따른 발생추력 및 1차 입력 전류의 변화를 그림 4.3에 역률 및 효율 특성을 그림 4.4에 나타내었다. 본 실험장치에서는 속도에 따른 발생 추력을 측정할 수 없어 기존 방법에 의한 결과와 본 연구에서 제안한 방법에 의한 결과를 비교, 검토하였다. 1차 입력 전류는 기존 방식에서는 철손을 무시하였으므로 본 방식보다 작게 나타났으나 발생 추력은 대동소이 하였다. 고슬립 영역에서는 기존방식이 전류는 작으나 역률이 높게 나타나 유효입력이 커 발생추력이 크게 나타나 효율은 같았다. 정격슬립인 0.65이하의 영역에서는 기존방식이 역률은 유사하나 발생 추력 및 입력전류가 본 방식보다 작아 효율은 같게 나타나 s = 0.2에서 최대 58.1[%]로 나타났다.

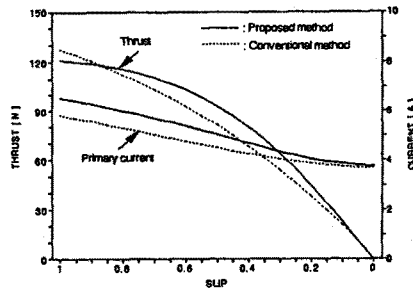


그림 4.3 슬립 대 추력, 입력전류

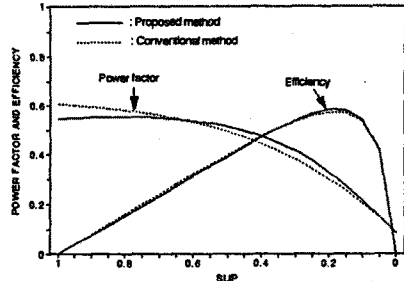


그림 4.4 슬립 대 역률, 효율

#### 5. 결론

본 연구에서는 1차 저항측정 및 구속시험을 결과로 부터 선형 유도 전동기의 특성을 계산하기 위한 새로운 등가회로 및 회로정수 산정방법을 제시하였으며 기동시의 계특성을 기존방식에 의한 결과와 실험치를 비교한 결과 매우 만족할 만한 결과를 얻었다. 즉, 고정도의 측정장비 및 인버터와 같은 고가의 장비 없이 간단한 측정장비 및 실험을 통하여도 정밀도가 높은 회로정수를 산정할 수 있었다.

앞으로, 측정장비의 디지털화 및 고속화가 이루어지면 더욱더 정밀한 특성해석이 가능하리라 사료된다.