

인버터로 구동되는 유도전동기의 정수 및 특성에 관한 연구

전내석*, 김종윤*, 박찬근*, 엄상오**, 이성근*, 김윤식*
 * 한국해양대학교, ** 양산대학

A Study on the Parameters and Characteristics of Induction Motor driven by Inverter

Nae-Suck Jeon, Jong-Yun Kim, Chan-Kun Park, Sang-O Eum, Sung-Geun Lee, Yoon-Sik Kim
 * Korea Maritime University, ** Yangsan College

Abstract - This paper presents the calculation method for the equivalent-circuit parameters and torque characteristics of squirrel-cage induction motors. The measurement of motor parameters were calculated by the stator resistance test, the blocked rotor test and no load test to T type equivalent-circuit.

Especially, this paper describes the test results obtained by using hall sensor and strain gauge for the current and torque characteristics of induction motors.

Three-phase squirrel-cage induction motor which has 1[hp] was used to the test and the parameters obtained by the test were compared with the maker parameters.

구성도는 그림 1과 같다.

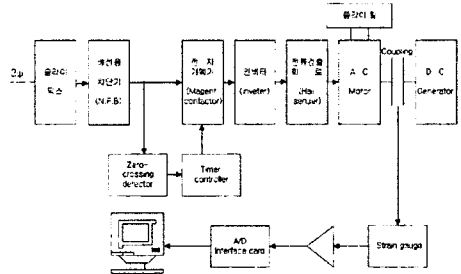


그림 1 실험장치 구성도

3. 실험 및 고찰

1. 서 론

최근 에너지 절약과 공장 자동화를 추진함에 있어서 전동기의 가변속은 필수 불가결하게 되었고 교류가변속 장치인 인버터는 상용전원의 전압과 주파수를 가변하여 공급함으로써 전동기의 속도를 쉽게 변화시킬 수 있다.

인버터에 의해 구동되는 농형 유도전동기는 가혹한 운전조건에서의 보수 경감, 에너지 절약 및 고효율화의 요구에 부합되어 산업체에서 널리 사용되고 있다.

가변속 전동기에 적합한 농형 유도전동기의 특성을 파악하기 위해 본 논문에서는 유도전동기의 기동 및 정상 운전상태에서의 제반 정수들을 직접 계속하여 그 결과를 고찰하였다. 그리고 유도전동기의 등가회로에서의 특성 해석과 실제 측정에서의 특성 등을 비교하여 유도전동기를 이해하는데 본 논문의 초점을 두었다. 유도전동기의 정수 측정은 일반적인 상용전원에서 널리 이용되고 있는 T형 등가회로를 이용하여 고정자 저항 실험, 무부하 및 구속 실험 등을 통하여 산정하였다. 그리고 무부하 실험에서는 각종 손실을, 감속 실험에서는 관성 모멘트 및 점성마찰계수를 산정하는 방법을 제시하였다. 부하변동에 대한 특성을 측정하기 위해 톨라이휠을 이용하였고 토크 특성 및 전류 측정은 스트레인 게이지(strain gauge) 및 홀 센서(hall sensor)를 이용한 전류검출회로를 이용하였다.

2. 실험장치의 구성

유도전동기의 1차측 전압을 제어하기 위하여 전원과 유도기의 고정자 사이에 4개의 단계를 거친 후 전자계측기의 확실한 동작을 위해서 타이머 제어회로를 설계하였고, 유도기의 입력전류를 측정하기 위해 전류검출회로를 이용하였으며, 부하 변동에 의한 전동기 특성 변화를 확인하기 위해 톨라이휠을 부착하였다. 또한, 토크의 측정을 위해 스트레인 게이지를 연결하여 전동기 기동 순간 속(shaft)의 변화량을 계속하였으며 전체 실험장치

3.1 고정자 권선 저항 측정

직류 전류가 고정자 권선으로 흘러 들어가면 고정자에 자계가 형성되고 회전자 축을 돌리는 힘이 없다면 고정자의 회전자 회로에 대한 누설 자속은 시불변으로 일정하게 유지된다. 회전자에 유기되는 전압이 없고 전류가 흐르지 않으므로 토크도 발생하지 않는다. 또한, 회전자는 고정자에 대해 전기적 회로로서 효과를 나타내지 못하고 기자력이 발생되지 않으므로 직류 권선 저항 측정은 회전자 임피던스에 독립적으로 측정되어 질 수 있다.

그림 2와 같이 회로를 구성하고 전압과 전류를 읽어 음(ohm)법칙을 적용 식 (3.1)과 같이 계산한다.

$$R_{dc} = \frac{V_{dc}}{I_{dc}} = \frac{2R_s \cdot R_s}{R_s + 2R_s} = \frac{2R_s^2}{3R_s} = \frac{2}{3} R_s$$

$$\therefore R_s = \frac{3}{2} R_{dc} = R, \quad (3.1)$$

여기서, 측정 저항값은 측정시 온도로 온도보상을 해주어야 한다. 보상은 IEEE Std 112 규정에 따라 식 (3.2)와 같이 하였다.

$$R_s = \frac{R_s(t_s + k)}{(t_s + k)} = \frac{3}{2} R_{dc} \cdot \frac{t_s + 234.5}{t_s + 234.5} \quad (3.2)$$

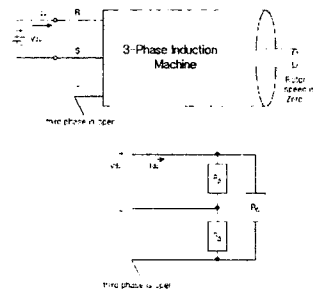


그림 2 고정자 권선 저항 측정 구성도

3.2 구속 실험(Blocked rotor test)

구속 실험은 변압기의 단락(short circuit) 실험에 해당하는 것으로 축이 고정되어 있기 때문에 회전자는 회전하지 못하므로 $\omega_m = 0$, $s = 1$ 인 상태이다.

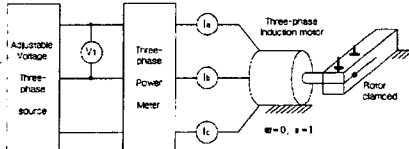


그림 3 구속 실험 결선도

이 실험에서 정격 전압 및 주파수를 인가하면 정격 전류의 5~8배 정도의 전류가 흘러 자기포화 현상이 일어나고, 또한 정격 전류가 큰 기기에 부담이 되므로 이 실험시에는 전압을 0[V]에서 서서히 올려 정격 전압 53[V]를 인가한다. 실험 주파수는 고정자의 정격 주파수와 운전시의 회전자 주파수를 절충하여 정격 주파수보다 낮은 주파수(15[Hz])를 인가한다^[5](본 논문에서는 정격 60[Hz]를 인가하였음). 이 실험에서 $s = 1$ 이므로 고정자 및 회전자의 전류는 동일 주파수를 가진다. 그래서 회전자와 고정자의 전류를 계산할 수 있는 것이다.

3.3 무부하 실험(No load test)

유도전동기의 무부하 실험은 변압기의 개방회로실험(open circuit test)과 비슷하며 이때 회전자에는 어떠한 기계적 부하도 걸지 않고 운전되며 고정자에는 정격 전압이 공급된다.

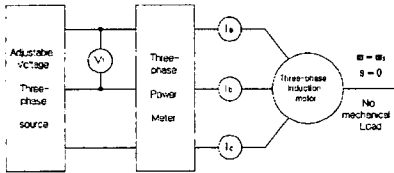


그림 4 무부하 실험 결선도

이 실험을 통하여 자화 콘덕턴스(G_m), 자화 서셉턴스(B_m) 및 무부하 손실을 구할 수 있다. 평형 3상전압이 공급되는 유도기에서 무부하 실험을 할 때에는 부하를 걸지 않으므로 유도기의 속도는 거의 동기속도와 같고 슬립도 아주 작다($s \approx 0$). 따라서 회전자 전류는 없으므로 가정한다. 무부하전력 P_{NL} 는 동손($I_m^2 R_s$), 마찰손과 풍손($P_{frict} + P_{wind}$) 및 철손(P_{iron})의 총합과 같다. 입력과 고정자 전류의 측정값을 입력전압에 대해서 그렸을 때에 마찰손과 풍손을 정할 수가 있다. 이 목적을 위하여 동손($P_c = I_m^2 R_s$)을 입력곡선에서 추출한다. 그리고 얻어진 새 전력곡선($P_{NL} - P_c$)은 0[V]까지 외삽법(보간법)으로 그려진다^[3]. 그러므로 풍손과 마찰손($P_{frict} + P_{wind}$)의 합계는 그림 5와 같이 구할 수 있다.

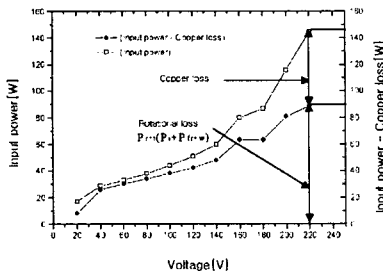


그림 5 무부하시 입력전력 및 손실

3.4 관성 모멘트 및 점성마찰계수 측정

전동기의 무부하 운전시 전원을 순간적으로 끊어버리면 수초가 지난 후 정지하였다. 이때의 속도변화 모양은 그림 6과 같이 기록되었다.

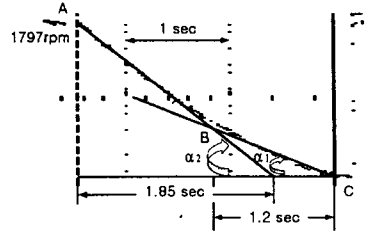


그림 6 감속 곡선

곡선을 AB와 BC 두 부분으로 나누어 생각한다. 처음 A에서 B까지는 속도가 빠르므로 점성 마찰저항과 건성 마찰 저항으로 감속되다가 속도가 감소함에 따라 점성마찰 저항은 소멸되고 속도와는 관계없는 건성마찰만 남게 되어 일정한 감각가속도로 되는 부분이 BC이다.

전동기의 무부하 회전시 회전력의 평형식은

$$T - T_F = J \frac{d\omega}{dt} \quad (3.3)$$

무부하 정상상태에서는 $d\omega/dt = 0$, $T = T_F$ 로 되어 있던중 전동기의 전원을 순간적으로 끊어버리면 식 (3.4)와 같이 성립한다.

$$-J \frac{d\omega}{dt} = -J\alpha_2 = T_F \quad (3.4)$$

잠시 후 감속되어 점성 저항을 무시할 수 있는 속도(그림 6의 BC 영역)에 도달하면

$$-J \frac{d\omega}{dt} = -J\alpha_1 = T_F \quad (3.5)$$

그림 6에서 감속곡선의 측정된 초기순간 감각가속도 α_2 는

$$\alpha_2 = \frac{\Delta\omega}{\Delta t} = \frac{2\pi \times 1800}{60 \times 1.85} = -101.89 [\text{rad/sec}^2] \quad (3.6)$$

여기서, 토크 T는

$$T = \frac{P_{NL}}{\omega} = \frac{145}{\frac{2\pi \times 1800}{60}} = \frac{145}{60\pi} \left[\frac{\text{N} \cdot \text{m}}{\text{sec}} \right] \quad (3.7)$$

토크 T는 전동기 내부 마찰 토크 T_F 와 평형이 된다.

$$\frac{145}{60\pi} = T_F = -J\alpha \quad (3.8)$$

따라서, 구하고자 하는 관성 모멘트 J는

$$J = \frac{1}{\alpha} \cdot \frac{145}{60\pi} = \frac{-1}{-101.89} \cdot \frac{145}{60\pi} = 0.0075 [\text{Kg} \cdot \text{m}^2] \quad (3.9)$$

그림 6의 감속곡선을 AB(α_2)와 BC(α_1) 두 부분으로 나누어 생각할 때 전동기의 회전력에는 평형이 성립되고 있다. 따라서, 점성 마찰계수를 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$T - T_F = J \frac{d\omega}{dt} \quad (3.10)$$

$$T = T_F = B\omega \quad (3.11)$$

$$J \frac{d\omega}{dt} = B(\omega_2 - \omega_1) \quad (3.12)$$

따라서, 구하고자 하는 점성마찰계수 B는

$$B = \frac{J \frac{d\omega}{dt}}{\omega_2 - \omega_1} = \frac{K(\alpha_2 - \alpha_1)}{\omega_2 - \omega_1}$$

$$= \frac{0.0075(101.89 - 52.36)}{188.5 - 62.8} \frac{[Kg \cdot m^2][rad/sec^2]}{[rad/sec]}$$

$$= 0.0029 [Kg \cdot m^2/sec] \quad (3.13)$$

4. 실험결과 및 검토

농형 유도전동기의 권선 저항 측정, 구속 및 무부하 실험 결과 공장 설계값(105°C)과 실험 측정값(20°C)이 아주 유사함을 확인하였다. 설계값과 측정값의 차이는 측정시의 온도에서 유래한다.

표 1 공장 설계값 및 실험 측정값 비교

명칭	기호	공장설계값 (105°C)	실험측정값 (20°C)	단위
고정자권선저항	R_s	13.48	9.9	[Ω]
회전자권선저항	R_r	10.5	7.54	[Ω]
고정자누설저항	X_s	8.61	7.956	[Ω]
회전자누설저항	X_r	11.79	11.934	[Ω]
자화 콘덕턴스	G_m	0.00033	0.00184	[S]
자화 서셉턴스	B_m	0.00611	0.0106	[S]

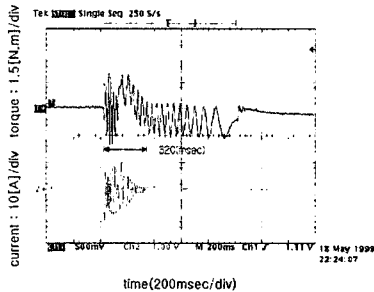


그림 7 인버터에 의한 토크, 전류(60(Hz))

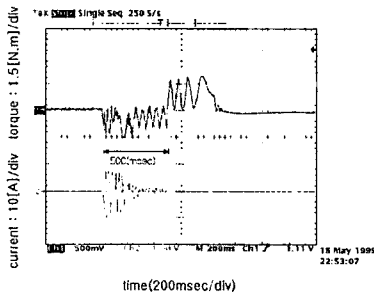


그림 8 인버터에 의한 토크, 전류(30(Hz))

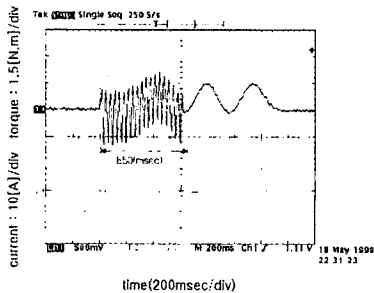


그림 9 인버터에 의한 토크, 전류(10(Hz))

그림 7부터 9까지는 인버터에 의해 주파수를 가변하여 운전할 경우의 기동시 토크 및 전류 파형이다. 토크 측정은 스트레인 게이지의 출력전압을 오실로스코프 파형으로 나타낸 것으로 이 파형에는 전동기 토크 변형과 탄성체의 진동 변형을 함께 포함하고 있다. 전류 측정은 전류검출회로의 출력전압을 측정한 것이다.

그림 8과 9에서 인버터 전원(운전주파수)의 감소에 따라 기동시 토크 및 전류의 맥동 주파수가 감소함을 알 수 있고 기동시간 또한 길어짐을 확인하였다. 여기서 초기 기동순간 부(-) 토크가 존재하는 것은 전동기의 힘보다 부하의 힘이 크기 때문이며 정상상태(1800rpm) 이후 부터는 정상적인 토크 모양을 보이고 있다.

5. 결 론

본 논문에서는 권선 저항 측정, 구속 및 무부하 실험 결과로부터 농형유도전동기의 등가회로 정수를 산정하였으며 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 유도전동기의 과도상태 특성을 통하여 시간 영역에서의 토크 및 전류 변화를 확인할 수 있었으며 인버터에 의한 가변속 운전시 고조파에 의한 전력손실 및 높은 주파수 성분의 리플을 확인하였다. 따라서 본 논문 결과는 농형 유도전동기의 기동특성 개선과 인버터용 전동기의 용도 및 용량에 따라 적합한 설계를 할 수 있는 좋은 자료가 될 것으로 사료되며 실험을 통해 본 논문에서 얻은 결과를 요약하면 다음과 같다.

- (1) 본 논문에서 제시한 권선 저항 측정, 구속 및 무부하 실험 기법으로 농형 유도전동기의 정수값을 측정 한 결과 제시한 바와 같이 실용적인 측정 결과를 얻을 수 있었다.
- (2) 기동시 순시 토크의 측정을 탄성 커풀링과 스트레인 게이지를 이용하여 시도하였으며, 기동시의 정량적인 토크의 변화를 파악하였다.
- (3) 감속곡선을 통하여 관성 모멘트(J) 및 점성 마찰계수(B)를 구할 수 있었고 측정 오차가 아주 적음을 확인하였다.
- (4) 정현파 전압원(상용전원) 기동에 비해 인버터 전원 사용시 약 2배의 기동시간이 소요되며 인버터의 출력 주파수가 낮을수록 기동시간이 증가함을 확인하였다.
- (5) 인버터 기동시 스위칭 작용에 의해 발생하는 고조파 성분의 영향으로 정현파 전압원보다 토크 및 전류 크기가 감소하고 상당히 높은 주파수 성분의 리플(맥동)이 발생하고, 출력 주파수가 낮을수록 감소함을 확인하였다.

(참 고 문 헌)

- [1] Paul C. Krause, Analysis 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 Mcpherson And Robert D.Laramore, An Introduction To Electrical Machines And Transformers, John Wiley And Sons, Inc. 1990.
- [5] IEEE Standard Test Procedure For Polyphase Induction Motors And Generators, 1996.
- [6] Paresh C. Sen, Principles of Electric Machines And Power Electronics, John Wiley And Sons, Inc. 1997.
- [7] Peter F. Ryff, Electric Machiney, Prentice Hall, 1994