

유도전동기의 운전 특성 예측을 위한 동적 시뮬레이터 구성

변한섭, 한성진
 동아대학교 전기공학과

Implementation of the Dynamic Simulator for Predicting Operating Characteristics of Three-Phase Induction Motors

H.S.Pyon, S.C.Hahn
 Dept. of Electrical Engineering, Dong-A Univ.
 schahn@daunet.donga.ac.kr

Abstract - This paper presents dynamic modeling and simulation of induction motors. Equivalent circuit parameters measured by dc test, no-load test and locked-rotor test were used as the input data for computer simulation. Operating characteristics of an induction motor were predicted by Matlab/Simulink when changing load torque, opening and reclosing of phase a of the stator and three-phase fault at machine terminals.

전동기에 부하를 걸고 토크와 속도 특성을 파악하기 위한 Dynamometer와 이것을 조정하고 전동기 출력과 토크를 표시하는 Programmable Controller, 전압, 전류, 전력, 역률을 분석하는 Power Analyzer, 이 data들을 수집하고 처리하여 표시하는 PC로 구성되어 있다.

시험 전동기 사양은 표 1에 나타내었다.

표 1. 시험 전동기 사양

Contents	Rated Value
Phase	3
Watts[W]	2.2
Volts[V]	220/440
Amps[A]	8.6/4.3
Freq.[Hz]	60
P.F.	0.82
Eff.[%]	82.5
RPM	1746
INS.	F

1. 서 론

3상 유도전동기는 구조의 단순성과 강인성 때문에 보수유지가 용이하고 외란에 대한 민감도가 낮으므로 각종 산업의 구동원으로 널리 이용되고 있다. 특히 크기, 무게, 회전자 관성, 최대 속도 발생 능력, 효율 및 비용, 운전 환경 등에서 직류전동기에 비해 우수한 특성을 가지고 있으며 구동기술의 발달로 그 적용 범위가 증가하고 있다. 이에 따라 유도전동기는 다양한 조건의 환경에서 운전될 것이고 갖가지 외란의 영향을 받을 것이다. 그러나 유도전동기의 운전 특성을 해석하고 예측하기 위해 직접 시험할 경우, 안전과 비용 문제를 고려해야하고 시험하기 어려운 경우가 발생할 수도 있다. 이에 비해 computer를 이용한 모의 시험은 실제 측정값과의 오차가 허용 한도를 만족한다면 이와 같은 직접 시험의 단점을 극복할 수 있을 것이다.

본 논문에서는 3상 유도전동기의 운전 특성 예측을 위해 정수 측정 시험으로 추출한 전동기의 등가 회로정수를 입력으로 하는 동적 시뮬레이터를 구성하였다. 그리고 부하 변동 및 고장자 전압 불평형에 따른 유도전동기의 운전 특성을 Matlab/Simulink를 이용하여 예측하였다.

2. 정수 측정 시험

2.1 시험 장치 구성

유도전동기의 정수 측정 시험을 위한 장치 구성도는 그림 1과 같다.

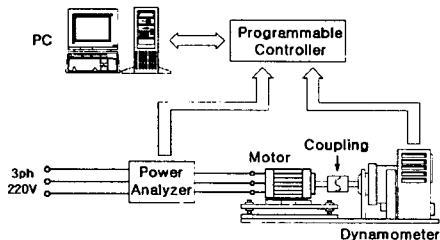


그림 1. 시험 장치 구성도

2.2 등가회로정수의 측정

유도전동기의 등가회로 정수 측정을 위해 DC Test, No-Load Test, Locked-Rotor Test를 행한다.

2.2.1 DC Test

고정자 저항을 측정하기 위해서 DC Test를 행한다. 이 시험은 고정자를 Y결선 한 후 DC 전류를 전동기의 세 단자 u, v, w 중에서 두 단자에 흘려서 단자 저항을 측정하는 시험이다[1]. 측정시 접속 저항에 주의 해야 한다.

$$r_s = \frac{r_t}{2} \cdot \frac{t_s + k}{t_t + k} [\Omega] \quad (1)$$

여기서,

- r_t : 단자간 평균 저항치[Ω]
- t_s : 절연종에 대한 기준 권선 온도[$^{\circ}\text{C}$]
- t_t : 저항 측정시 권선 온도[$^{\circ}\text{C}$]
- k : 동선일 경우 234.5, Al선일 경우 225

이다.

2.2.2 Locked-Rotor Test

회전자 저항 및 고정자와 회전자 누설 리액탄스를 추출하기 위해 Locked-Rotor Test를 행한다. 거의 정격 전류에 가까운 구속전류가 흐르도록 전압을 조정하여 측정한다. 회전자 저항을 구하기 위한 식은 다음과 같다.

$$r_r = P_{in,locked} / (3I_{s,locked}) - r_s [\Omega] \quad (2)$$

여기서, $P_{in,locked}$ [W]는 구속 입력이고 $I_{s,locked}$ [A]는 구속 전류이다. 그리고 누설 리액턴스를 구하는 식은 다음과 같다.

$$x_{ls} + x_{lr} = \sqrt{Z_{short}^2 - (P_{in,locked} / (3I_{s,locked}))^2} [\Omega] \quad (3)$$

$$x_{ls} / x_{lr} = 0.4 / 0.6 : \text{Class B 전동기의 경우} \quad (4)$$

여기서, $Z_{short} = V_{s,locked} / (\sqrt{3}I_{s,locked})$ [Ω]이고 $V_{s,locked}$ [V]는 임피던스 전압이다.

2.2.3 No-Load Test

사화 리액턴스 x_m 을 추출하기 위해 No-Load Test를 행한다[2-4]. 유도전동기를 무부하 상태로 운전하여 측정한다. 피상전력 S[VA], 유효전력 P[W], 무효전력 Q[Var]의 관계는 다음과 같다.

$$S^2 = P^2 + Q^2 \quad (5)$$

$$P = P_{in,no} - P_{fw} \quad [W] \quad (6)$$

여기서, $P_{in,no}$ [W]는 무부하 입력이고 P_{fw} [W]는 마찰손과 풍손이다. P_{fw} [W]는 무부하 시험에서 전압의 변화에 대한 무부하 손실 곡선으로부터 얻을 수 있다. 그러므로 x_m 은 다음과 같다.

$$x_m = V_s^2 / \sqrt{(\sqrt{3}V_s I_0)^2 - (P_{in,no} - P_{fw})^2} - X_{ls} [\Omega] \quad (7)$$

3. 유도전동기의 동적 모델링

유도전동기의 고정자와 회전자가 각각 Y결선 되어있을 경우 전압 방정식은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} [v_{abcs}] &= [v_{abcs}] - [v_{ss}] \\ [v_{abcr}] &= [v_{abcr}] - [v_{rr}] \end{aligned} \quad (8)$$

여기서, v_{ss} 와 v_{rr} 은 각각 고정자와 회전자 중성점 간 전압이다.

유도전동기의 동적 특성을 표현하기 위해서는 상전압을 dq좌표계로 변환해야 하는데, 본 논문에서는 상전압을 정지 dq좌표계로 변환한다.

식(8)의 고정자 상전압을 정지 dq전압으로 변환하기 위해서 변환행렬 [T]를 이용한다. 회전자 상전압에 대해서는 [T]을 이용하여 q축이 회전자의 a상 축과 일치하는 회전 dq전압으로 변환한 후 이것을 변환행렬 [S]를 이용하여 정지 dq전압으로 변환한다[5-6].

$$\begin{aligned} [v_{qd0s}] &= [T][v_{abcs}] \\ [v_{qd0r}] &= [T][v_{abcr}] \\ [v_{qd0r}'] &= [S][v_{qd0r}] \end{aligned} \quad (9)$$

아래첨자 s와 r은 각각 고정자와 회전자로, 윗첨자 s와 r은 각각 정지 좌표계와 회전 좌표계를, 프라임은 고정자축 환산값을 의미한다.

한편, 식(9)의 정지 dq전압 방정식은 정지 dq좌표계의 등가 회로의 전압 방정식과 같다. 그러므로 $p = d/dt$, ω_b = 정격 각속도, ω_r = 회전자 각속도일 경우 정지 dq전압 방정식은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} [v_{qd0s}] &= r_s [i_{qd0s}] + \frac{D}{\omega_b} [\Psi_{qd0s}^s] \\ [v_{qd0r}'] &= r_r [i_{qd0r}'] + \frac{D}{\omega_b} [\Psi_{qd0r}^s] + \frac{\omega_r}{\omega_b} [\Psi_{qd0r}^s] \end{aligned} \quad (10)$$

여기서, $[\Psi_{dq0r}^s]^T = [-\Psi_{dr}^s \ \Psi_{qr}^s \ 0]$ 이다. 또한

$$\begin{aligned} [\Psi_{qd0s}^s] &= x_{ls} [i_{qd0s}^s] + [\Psi_{mqd0}^s] \\ [\Psi_{qd0r}^s] &= x_{lr} [i_{qd0r}^s] + [\Psi_{mqd0}^s] \end{aligned} \quad (11)$$

여기서 $[\Psi_{mqd0}^s]^T = [\Psi_{mq}^s \ \Psi_{md}^s \ 0]$, $\Psi_{mq}^s = x_m (i_{ds}^s + i_{dr}^s)$
 $\Psi_{md}^s = x_m (i_{ds}^s - i_{dr}^s)$ 이다.

유도전동기의 토크 방정식은 정지 dq방정식과 운동 방정식으로 표현할 수 있다.

$$\begin{aligned} T_e &= (3P) / (4\omega_b) \cdot (\Psi_{ds}^s i_{qs}^s - \Psi_{qs}^s i_{ds}^s) \\ &= (2J/P) \cdot p\omega_r + T_L \end{aligned} \quad (12)$$

여기서, T_e 는 전자기 토크이고 T_L 은 부하 토크이다.

4. 측정 결과 및 시뮬레이션

4.1 점수 측정 시험 결과

점수 측정 시험 결과를 표 2에 나타내었다.

표 2. 시험 전동기의 측정 점수

Parameter [Ω]	Measured Value
r_s	4.77
r_r	2.38
x_{ls}	3.83
x_{lr}	5.75
x_m	129.51

4.2 시뮬레이션

Matlab/Simulink를 이용하여 구성한 동적 시뮬레이터는 다음과 같다.

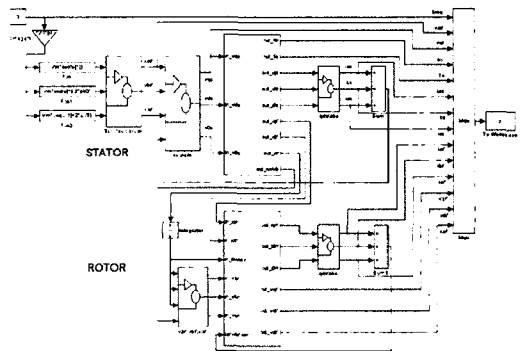
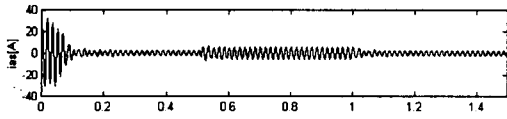


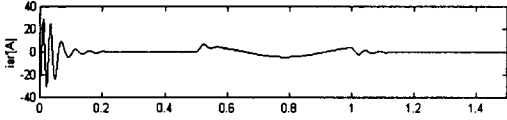
그림 2. 3상 유도전동기의 동적 시뮬레이터

4.2.1 부하 토크의 변화

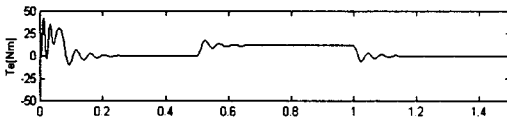
유도전동기를 무부하 기동시킨 후, 0.5초에서 1초까지 0.5초 동안 정격 부하를 걸어주었다. 이것은 무부하 운전 중인 유도전동기에 돌발적인 부하를 걸어 줄 때와 이를 갑자기 제거할 때의 운전 특성을 알아보기 위한 것으로 시뮬레이션 결과는 다음과 같다.



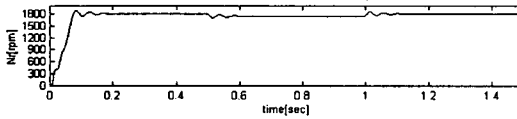
(a) 고정자 a상 전류 i_{as} [A]



(b) 회전자 a상 전류 i_{ar} [A]



(c) 토크 T_e [Nm]

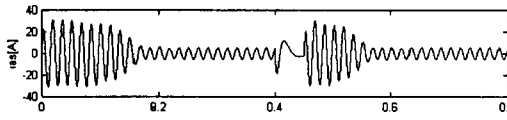


(d) 회전자 속도 N_r [rpm]

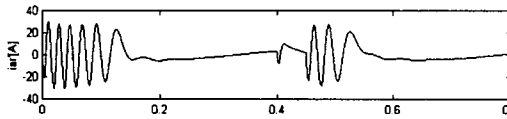
그림 3. 부하 토크의 변화에 대한 운전 특성

4.2.2 기기 단자에서의 3상 고장

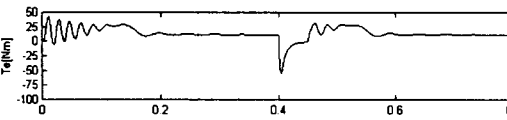
전동기가 정격 부하에서 기동하여 운전 중 단자에서 3상 고장을 일으켰을 때의 운전 특성은 다음과 같다. 0.4초에서 0.45초까지 0.05초간 고장 조건을 주었다.



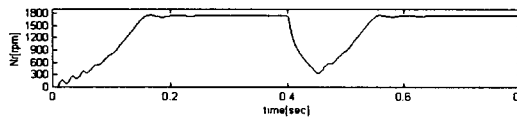
(a) 고정자 a상 전류 i_{as} [A]



(b) 회전자 a상 전류 i_{ar} [A]



(c) 토크 T_e [Nm]

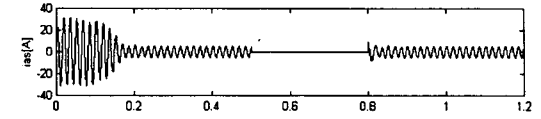


(d) 회전자 속도 N_r [rpm]

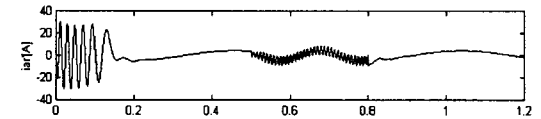
그림 4. 3상 고장에 대한 운전 특성

4.2.3 고정자 1상의 개폐

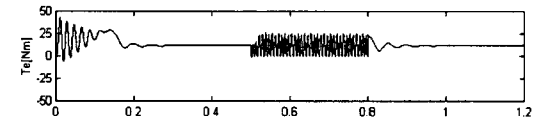
불평형 공급원에 대한 전동기의 운전 특성을 예측하기 위해 정격 부하에서 기동하여 운전 중인 3상 유도전동기의 3상 중에서 1상을 0.5초에서 개방시켰고 0.8초에서 다시 닫았다. 이 때 3상 유도전동기는 단상 유도전동기로서 운전하게 된다.



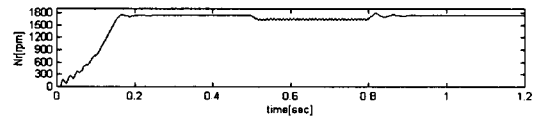
(a) 고정자 a상 전류 i_{as} [A]



(b) 회전자 a상 전류 i_{ar} [A]



(c) 토크 T_e [Nm]



(d) 회전자 속도 N_r [rpm]

그림 5. 고정자 a상 개폐에 대한 운전 특성

5. 결 론

본 논문에서는 3상 유도전동기의 운전 특성 예측을 위해 정수 측정 시험으로 추출한 전동기의 등가 회로정수를 입력으로 하는 동적 시뮬레이터를 구성하였다. 그리고 부하 변동 및 고정자 전압 불평형에 따른 유도전동기의 운전 특성을 Matlab/Simulink를 이용하여 예측하였다. 본 시뮬레이터는 전동기의 controller 설계나 급격한 부하 변화 및 과부하에 대한 영향, 시스템에서의 과도 상태 연구에 이용될 수 있을 것이다.

(참 고 문 헌)

- [1] IEEE Standards Board, "IEEE Standard Test Procedure for Polyphase Induction Motor", IEEE, 1991.
- [2] Peter Vas, *Parameter Estimation, Condition Monitoring, and Diagnosis of Electrical Machines*, Clarendon Press Oxford, pp182-184, 1993.
- [3] Syed A. Nasar, *Electric Machines and Electromechanics*, McGraw-Hill, pp105-106, 1997.
- [4] Philip L. Alger, *The Nature of Induction Machines*, Gordon and Breach, pp117-119, 1965.
- [5] Chee-Mun Ong, *Dynamic Simulation of Electric Machinery*, Prentice Hall PTR, pp170-243, 1998.
- [6] P.C. Krause, *Analysis of Electric Machinery*, IEEE Press, pp164-210, 1995.