

3상유도전동기의 간이등가회로에 의한 비례추이 오차

(Errors of Proportional Shifting due to Simplified Equivalent Circuit of a 3-Phase Induction Motor)

신명호*

(Myoung-Ho Shin)

Abstract

It is well known that the maximum torque of a 3-phase induction motor does not vary as the resistance of rotor varies by proportional shifting. However, proportional shifting is derived using simplified equivalent circuit of induction motor. Therefore, there are some errors in the torque characteristics shown in the text book. This paper presents the torque characteristics using not simplified equivalent circuit but equivalent circuit. Errors produced by simplified equivalent circuit are presented.

Key Words : Induction Motor, Proportional Shifting

1. 서 론

전기에너지의 50% 이상을 전동기가 소비하고 있으며, 이 중 거의 대부분을 유도전동기가 소비하고 있다. 따라서 유도전동기에 관한 연구들이 진행되어 왔다 [1-2].

유도전동기의 등가회로에서 자화인덕턴스는 고정자 임피던스와 회전자임피던스의 중간부분에 위치하게 된다. 유도전동기의 특성의 해석을 위하여 등가회로

를 해석할 때 중간부분에 위치한 자화인덕턴스 때문에 회로의 해석이 복잡하게 되기 때문에 자화인덕턴스를 회로의 입력단으로 옮긴 간이등가회로를 사용하게 된다[3].

그런데 변압기와는 달리 유도전동기는 구조적으로 공극을 가지고 있기 때문에 자화전류가 크게 되고, 따라서 자화인덕턴스를 입력단으로 옮긴 간이등가회로를 사용하게 되면 해석에 오차가 커지는 문제가 발생한다[3-5].

유도전동기의 비례추이현상에 의하면 회전자 저항을 k 배 하면 같은 크기의 토크가 슬립에 k 배 한 곳에서 발생하게 되고 따라서 회전자저항을 변화시켜도 최대토크의 크기에는 변화가 없고 최대토크가 발생하는 슬립에 변화만 생기게 된다[3-5]. 그러나 비례추이의 설명을 위한 수식의 전개에는 자화임피던스를 입력단으로 옮겨서 근사화시키거나[3], 또는 전개과정에

* 주저자 : 서울과학기술대학교 전기정보공학과 부교수

* Main author : Dept. of Electrical and Information Engineering, Seoul Nat'l Univ. of Science and Technology

Tel : 02-970-6408, Fax : 02-978-2754

E-mail : mhshin@seoultech.ac.kr

접수일자 : 2012년 12월 20일

1차심사 : 2012년 12월 22일

심사완료 : 2013년 1월 3일

서 복잡성을 회피하기 위한 근사화[4]가 존재하며, 이 때문에 해석의 오차가 발생하게 된다.

본 논문에서는 간이등가회로가 아닌 자화인덕턴스가 중간에 위치한 유도전동기의 모델을 사용하여 속도변화에 따른 토크를 해석한다. 시뮬레이션 결과 회전자저항이 변화할 때 최대토크의 크기가 일정하지 못하고 변화하며, 특히 회전자저항을 작은 값으로 감소시키면 최대토크의 값이 급격히 감소하는 것을 보여서 기존의 교과서에 수록된 비례추이 현상과 비교한 오차를 보인다.

2. 비례추이

3상 유도전동기의 간이등가회로로부터 유도된 토크는 식 (1)과 같다[3].

$$T = \frac{3V_1^2}{\omega_s [(R_s + \frac{R_r}{s})^2 + (X_s + X_r)^2]} \times (\frac{R_r}{s}) \quad (1)$$

여기서 V_1 은 공급전압, R_r 은 고정자로 환산된 회전자저항, s 는 슬립, ω_s 는 동기각속도, R_s 는 고정자저항, X_s 는 고정자 누설리액턴스, X_r 은 고정자로 환산된 회전자누설리액턴스이다.

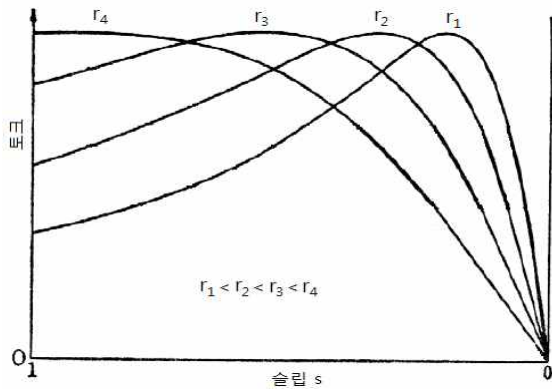


그림 1. 비례추이
Fig. 1. Proportional shifting

그림 1은 식 (1)을 이용하여 구한 토크곡선을 나타내고 있다. r_1, r_2, r_3, r_4 는 회전자저항이며 회전자저항

을 증가시킴에 따라 최대토크가 발생하는 슬립이 증가하고 있는 모습을 나타내고 있다. 또한 회전자저항이 증가해도 최대토크의 크기는 변화가 없음을 알 수 있다. 그러나 식 (1)을 구하는 과정에 이루어진 근사화로 인한 오차 때문에 회전자저항을 변화시킬 때의 토크의 파형은 그림 1과는 다르게 된다.

3. 유도전동기 모델

유도전동기의 정지좌표계에서의 고정자 전압방정식은 식 (2), 회전자 전압방정식은 식 (3)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\vec{v}_s^s = (R_s + pL_s)\vec{i}_s^s + pL_m\vec{i}_r^s \quad (2)$$

$$\vec{v}_r^s = (p - j\omega_r)L_m\vec{i}_s^s + [R_r + (p - j\omega_r)L_r]\vec{i}_r^s \quad (3)$$

여기서 위첨자 “s”는 정지좌표계를 의미하며, p 는 미분연산자, ω_r 은 회전자속도, L_s 는 고정자자기인덕턴스, L_r 은 회전자자기인덕턴스, L_m 은 자화인덕턴스이며, 농형유도전동기는 회전자가 단락되어 있으므로 \vec{v}_r^s 는 0이다.

식 (2) 및 식 (3)을 정지좌표계의 d, q축 성분으로 표현하면 다음의 식 (4)와 같다.

$$\begin{bmatrix} v_{ds}^s \\ v_{qs}^s \\ v_{dr}^s \\ v_{qr}^s \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s + pL_s & 0 & pL_m & 0 \\ 0 & R_s + pL_s & 0 & pL_m \\ pL_m & \omega_r L_m & R_r + pL_r & \omega_r L_r \\ -\omega_r L_m & pL_m & -\omega_r L_r & R_r + pL_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{ds}^s \\ i_{qs}^s \\ i_{dr}^s \\ i_{qr}^s \end{bmatrix} \quad (4)$$

식 (4)를 정리하면 식 (5)와 같다.

$$\begin{bmatrix} v_{ds}^s \\ v_{qs}^s \\ v_{dr}^s \\ v_{qr}^s \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s & 0 & 0 & 0 \\ 0 & R_s & 0 & 0 \\ 0 & \omega_r L_m & R_r & \omega_r L_r \\ -\omega_r L_m & 0 & -\omega_r L_r & R_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{ds}^s \\ i_{qs}^s \\ i_{dr}^s \\ i_{qr}^s \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} L_s & 0 & L_m & 0 \\ 0 & L_s & 0 & L_m \\ L_m & 0 & L_r & 0 \\ 0 & L_m & 0 & L_r \end{bmatrix} \cdot \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_{ds}^s \\ i_{qs}^s \\ i_{dr}^s \\ i_{qr}^s \end{bmatrix} \quad (5)$$

식 (5)를 전류에 대해서 정리하면 식 (6)과 같이 표현된다[6].

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_{ds}^s \\ i_{qs}^s \\ i_{dr}^s \\ i_{qr}^s \end{bmatrix} = \frac{1}{L_q} \left(\begin{bmatrix} L_r & 0 & -L_m & 0 \\ 0 & L_r & 0 & -L_m \\ -L_m & 0 & L_s & 0 \\ 0 & -L_m & 0 & L_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_{ds}^s \\ v_{qs}^s \\ v_{dr}^s \\ v_{qr}^s \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -R_s L_r & \omega_r L_m^2 & R_r L_m & \omega_r L_r L_m \\ -\omega_r L_m^2 & -R_s L_r & -\omega_r L_r L_m & R_r L_m \\ R_s L_m & -\omega_r L_s L_m & -R_r L_s & -\omega_r L_r L_s \\ \omega_r L_s L_m & R_s L_m & \omega_r L_s L_r & -R_r L_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{ds}^s \\ i_{qs}^s \\ i_{dr}^s \\ i_{qr}^s \end{bmatrix} \right) \quad (6)$$

여기서 $L_q = \sqrt{L_s L_r - L_m^2}$ 이다. 토크는 식 (7)과 같다.

$$T_e = \frac{3P}{4} L_m (i_{qs}^s i_{dr}^s - i_{ds}^s i_{qr}^s) \quad (7)$$

여기서 P 는 극수이다.

4. 시뮬레이션 결과

시뮬레이션은 ACSL을 사용해서 수행했으며, 3상 유도전동기의 파라미터는 표 1과 같다.

표 1. 3상 유도전동기 파라미터
Table 1. 3-Phase induction motor parameters

극수	4
정격전압	220Vrms
고정자저항	0.294Ω
회전자저항	0.15Ω
자화인덕턴스	41mH
고정자누설인덕턴스	1.4mH
회전자누설인덕턴스	0.7mH

그림 2는 직입기동한 경우의 시뮬레이션 결과이다. 기동 초기에 토크에 매우 강한 진동이 나타나고 있음을 알 수 있다. 구조적으로 토크각이 90도를 유지하는 직류전동기와는 달리 유도전동기의 토크각은 과도상태에서 90도가 되지 못하고 변화해서 토크가 심하게 진동하게 된다. 유도전동기를 직입기동하게 되면 심한 토크진동은 커플링, 기어 등과 같은 기계부분에 충

격을 가해서 수명을 단축시키는 원인으로 작용하게 된다[6].

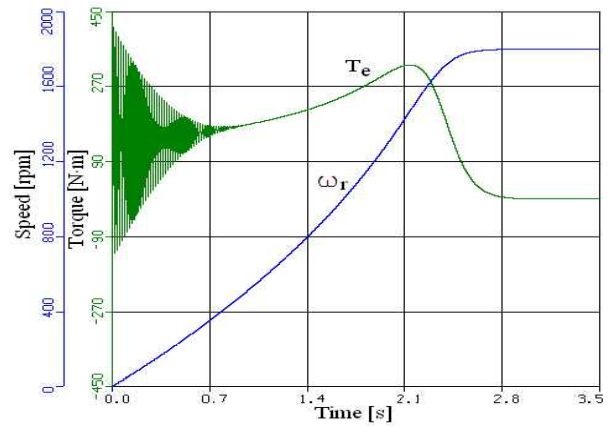


그림 2. 직입기동(무부하, 회전자저항: 0.15Ω)
Fig. 2. Direct-on-line starting (No load, rotor resistance: 0.15Ω)

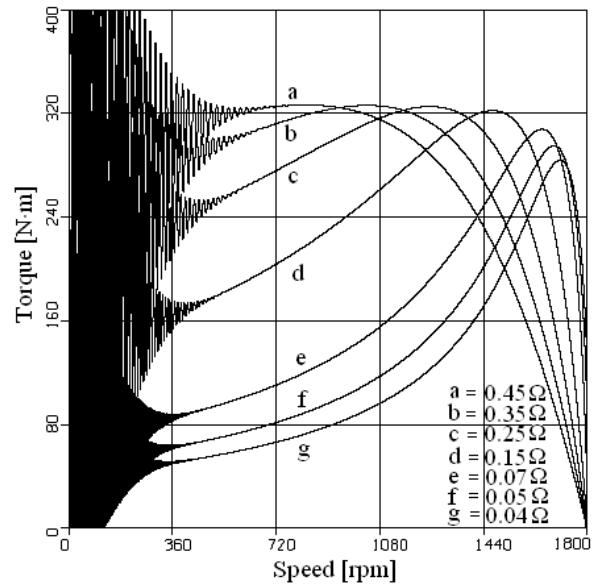


그림 3. 회전자저항 변화시의 토크
Fig. 3. Torque as rotor resistance varies

그림 3은 고정자저항을 변화시킬 때의 직입기동을 한 시뮬레이션결과이다. 부하는 무부하이므로, 속도에 따른 토크의 값을 나타내고 있다. 회전자저항의 값이 0.45Ω에서 0.25Ω까지 변화할 때 최대토크의 값의 감소는 매우 작아서 최대토크는 거의 일정한 것처럼 보

인다. 그러나 0.15Ω으로 변화되면 최대토크의 크기는 좀 더 감소하게 되고, 회전자저항이 0.07Ω, 0.05Ω, 0.04Ω으로 감소함에 따라 최대토크의 크기는 큰 폭으로 감소하고 있는 것을 알 수 있다. 그림 1에서 회전자저항값의 변화에도 최대토크의 값의 변화는 없는 것으로 나타났으나 간이등가회로가 아닌 실제의 등가회로를 이용해서 해석했을 때 회전자저항값의 감소에 따라 최대토크의 크기는 완만하게 감소하다가 회전자저항의 어느 값 이하의 영역에서는 회전자저항의 감소에 따라 최대토크가 급속히 감소하게 됨을 알 수 있다.

5. 결 론

본 논문에서는 3상 유도전동기의 등가회로를 이용하여 유도전동기의 직입기동시 회전자저항 변화에 따른 토크특성을 해석하였으며, 간이등가회로를 이용하여 구한 회전자저항 변화시의 토크특성과 비교하여 간이등가회로로의 근사화에 의해서 발생한 오차를 제시하였다. 시뮬레이션결과, 회전자저항을 감소시킴에 따라 최대토크 값은 완만히 감소하다가 회전자저항의 어느 값 이하의 영역에서는 최대토크의 크기가 급격히 감소함을 확인하였다. 권선형 유도전동기의 제어에 본 논문의 결과를 고려한다면 개선된 제어성능을 얻을 수 있을 것으로 사료된다.

References

- [1] M-H. Shin, "Maximum efficiency control of a stator flux-oriented induction motor drive" Journal of KIIE, vol. 20, no. 4, pp. 117-122, 2006.
- [2] Myoung-Ho Shin, "Analysis on Parameter Detuning of Induction Motor Drives in Field Weakening Region", Journal of KIIE, vol. 24, no. 9, pp. 118-123, 2010.
- [3] Yoon-Jong Lee, "Electric Machinery" Dongmyoung Press, Korea, pp. 285-286, 2001.
- [4] Stephen J. Chappan, "Electric Machinery Fundamentals", 5th Edition, McGraw-Hill Korea, 2012.
- [5] Energy Conversion Lab. of Hanyang Univ., "Electric Machinery", 2nd Edition, Hongneung Science Press, Korea, pp.373, 2011.
- [6] A. M. Trzynadlowski, "The Field Orientation Principle in Control of Induction Motors", Kluwer Academic Publishers, Massachusetts USA, pp.1-38, 1994.

◇ 저자소개 ◇



신명호 (申明昊)

1967년 11월 27일생. 1989년 한양대 공대 전기공학과 졸업. 1991년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 2001년 동 대학원 전기공학과 졸업(박사). 1991~1996년 삼성종합기술원 근무(선임연구원). 2002년 8월~현재 서울과학기술대학교 전기정보공학과 부교수.