

논문 2015-52-8-14

유도전동기의 고성능 벡터 제어를 위한 유도전동기 정수 측정 (Motor Parameter Measurement for High Performance Vector Control of an induction Motor)

한 상 수*

(Sang-Soo Han[Ⓢ])

요 약

유도전동기의 고성능 속도 제어를 위해서는 전동기 정수의 정확한 측정이 필요하다. 특히 전동기의 토크 제어를 위해 사용되는 벡터 제어의 경우 회전자 저항과 인덕턴스의 향으로 주어지는 시정수는 제어기의 성능에 큰 영향을 준다. 또한 고정자 저항과 누설 인덕턴스는 전류제어기와 속도 제어기의 이득을 구하고 설계하는 중요한 변수가 된다. 본 논문에서는 기존의 정수 측정 방법을 수정 보완한 새로운 유도 전동기 정수 측정방법을 제시한다.

Abstract

The accuracy of motor parameter measurement is necessary to improve the performance of vector control of an induction motor. The rotor time constant affects the performance of controller and also the resistance and leakage inductance of stator are very important design parameters of current and speed controller. In this paper a new modified motor parameter measurement methods for high performance speed control of vector control of an induction motor are proposed.

Keywords : motor parameter measurement, induction motor, current and speed controller, vector control

I. 서 론

유도전동기 벡터제어는 정상상태뿐 아니라 과도상태에서도 토크의 순시성과 속응성이 우수하여 모터의 가변속 운전에 직류전동기에 대치되어 사용되고 있다. 이러한 유도전동기 벡터제어 방식에는 크게 두 가지 즉 직접벡터제어방식과 간접벡터제어방식이 있으며 두 제어방식 모두 회전자의 자속을 검출할 수 있는 센서가 요구되며 센서의 성능이 유도전동기의 특성에 많은 영향을 준다^[1~2]. 특히 센서의 성능은 센서의 가격에 비해

하여 비싸지기 때문에 전체 시스템의 가격이 상승하는 단점이 있다. 또한 센서의 신뢰성문제와 센서의 노이즈의 영향으로 인한 시스템의 불안정성등 많은 문제점이 발생한다. 이러한 문제점을 해결하기 위한 센서리스 벡터제어방식에 대한 많은 연구가 많은 연구가 진행되고 있다^[4~5]. 센서리스 벡터제어가 정확하게 구현되기 위해서는 유도전동기의 시정수가 정확하게 유도되어야 하는 문제가 발생된다. 따라서 유도 전동기의 고성능 속도 제어를 위해서는 전동기 정수의 정확한 측정이 필요하다. 특히 전동기의 토크 제어를 위해 사용되는 벡터 제어에서는 전동기 회전자의 인덕턴스와 저항으로 계산되는 회전자의 시정수가 벡터 제어의 성능을 좌우하는 필수적인 요소이다. 그 외의 전동기 정수로써 고정자 저항과 고정자 누설 인덕턴스가 제어기의 설계 정수로 사용된다. 이들 정수는 전류 제어기의 이득과 속

* 평생회원, 가천대학교 에너지 IT학과
(Department of Energy and Information
Technology, Gachon University)

Ⓢ Corresponding Author(E-mail: sshan@gachon.ac.kr)

Received ; March 23, 2015 Revised ; July 26, 2015

Accepted ; July 27, 2015

도 제어기의 이득을 결정하는 설계 정수로 사용되고, 좀 더 고성능의 유도 전동기 제어를 위해서 옵저버, 필터 등의 제어 이론을 적용할 때 사용된다^[3, 6-7]. 본 논문에서는 기존의 전동기 정수 측정방법을 수정한 벡터 제어를 기준한 정수 측정 방법을 제시하고 실험을 통해 타당성을 검증하였다.

II. 유도 전동기 정수 측정

1. 기존의 유도전동기 정수 측정

유도전동기의 등가회로는 그림 1과 같다. 그림 1에서 회로 임피던스는 다음과 같다.

R_s : 고정자 저항, X_{ls} : 고정자 누설 리액턴스

X_m : 자화 리액턴스, R_c : 철손실 저항

X_{lr} : 회전자 누설 저항, R_r : 회전자 저항, S : 슬립

기존의 고정자 저항 측정은 전동기를 멈춘 상태에서 전동기 두 단자 사이에 직류 전압을 인가하여 식(1)과 같이 구해진다.

$$R_s = \frac{V_{dc}}{I_{dc}} \quad (1)$$

회전자 저항 측정은 회전자 구속 시험을 통해 구한다. 고정자에 정격 전류가 흐르게 하고 회전자를 구속하기 위하여 낮은 전압을 인가한다. 슬립은 1이 되고 자화 임피던스는 회전자 임피던스보다 크게 되어 자화 임피던스에 흐르는 전류는 무시될 수 있기 때문에 회전자 임피던스(Z_{bl})는 단자에 공급된 전압(V_{bl}), 전류(I_{bl}) 그리고 입력전력(P_{bl})과 공급 전압과 전류의 위상차(θ)를 측정하여 식(2)와 같이 구할 수 있다.

$$Z_{bl} = \frac{V_{bl}}{I_{bl}} \angle \tan^{-1}\theta \quad (2)$$

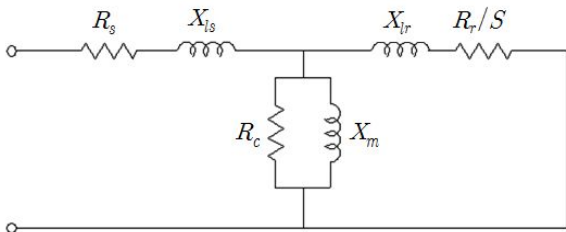


그림 1. 유도 전동기 단상 등가 회로

Fig. 1. Per-phase equivalent circuit of an Induction Motor.

고정자와 회전자의 저항과 리액턴스는 식(3), (4)와 같이 주어진다.

$$R_s + R_r = Re\{Z_{bl}\} \quad (3)$$

$$X_{ls} + X_{lr} = Im\{Z_{bl}\} \quad (4)$$

X_{ls} 와 X_{lr} 의 관계는 식(5)와 같은 NEMA class 모터 자료를 이용하였다.

$$X_{ls} = \left(\frac{2}{3}\right)X_{lr} \quad (5)$$

자화 리액턴스는 무 부하 시험을 통해 구한다. 이때 슬립은 영이되 때문에 회전자 임피던스는 무한대가되므로 무 부하 입력 임피던스(Z_{nl})는 전압(V_{nl}), 전류(I_{nl}) 그리고 입력 전력(P_{nl})과 공급 전압과 전류의 위상차(ψ)를 측정하여 식(6)과 같이 구할 수 있다.

$$Z_{nl} = \frac{V_{nl}}{I_{nl}} \angle \tan^{-1}\psi \quad (6)$$

무 부하 필드 임피던스(Z_{fnl})는 식(7)과 같이 주어진다.

$$Z_{fnl} = Z_{nl} - (R_s + jX_{ls}) \quad (7)$$

무 부하 필드 어드미턴스(Y_{fnl})를 Z_{fnl}^{-1} 라 정의하면 철손실 저항(R_c)과 자화 리액턴스(X_m)는 식(8),(9)와 같다.

$$R_c = \frac{1}{Re\{Y_{fnl}\}} \quad (8)$$

$$X_m = \frac{-1}{Im\{Y_{fnl}\}} \quad (9)$$

2. 벡터 제어를 기준한 고정자 저항 측정

벡터 제어를 기본으로 한 시스템에서의 고정자 저항 측정은 그림 2와 같이 전동기 두 단자에 직류 전압을 인가하는 DC시험을 통해 구한다. 이때 전동기는 회전하지 않는 상태에서 단상으로 운전 한다. 단상 운전은 식(10)와 같이 토크 분 즉 q축 전류(i_{qs}^e)를 0로 유지하고 d축 전류(i_{ds}^e)를 제어함으로써 가능하다.

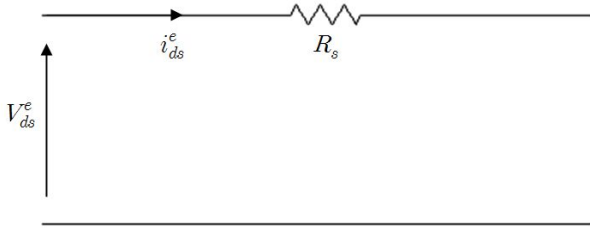


그림 2. 고정자 저항 등가회로
Fig. 2. Equivalent circuit of Stator Resistance.

$$i_{qs}^e = 0, \omega_e = 0 \tag{10}$$

고정자 저항(R_s)는 식(11)과 같이 d축 전류와 전압의 비로 주어진다.

$$R_s = V_{ds}^e / i_{ds}^e \tag{11}$$

실제 고정자전압은 데드타임 및 IGBT 전압강하 등의 왜곡 전압을 포함하고 있다. 왜곡전압을 보상한 실제 고정자전압은 식(12)와 같다.

$$V_{ds}^e = R_s i_{ds}^e + V_{err} \tag{12}$$

(단 V_{err} 은 전류의 방향이 일정하면 일정한 것으로 본다.)

왜곡전압을 보상한 고정자 저항은 고정자 전류의 방향을 일정한 방향으로 정한 후 크기만을 변화 시켜 식(13),(14)와 같이 고정자 전압을 두 번 측정할 후 식(15)와 같이 구할 수 있다.

$$V_{ds1}^e = R_s i_{ds1}^e + V_{err} \tag{13}$$

$$V_{ds2}^e = R_s i_{ds2}^e + V_{err} \tag{14}$$

$$R_s = \frac{V_{ds1}^e - V_{ds2}^e}{i_{ds1}^e - i_{ds2}^e} \tag{15}$$

3. 벡터 제어를 기준한 누설 인덕턴스 측정

유도 전동기의 전압 전류 방정식을 동기 좌표계로 표현하면 식 (16)과 같다.

$$\begin{bmatrix} V_{qs}^e \\ V_{ds}^e \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s & \omega_e L_s & 0 & \omega_e L_m \\ -\omega_e L_s & R_s & -\omega_e L_m & 0 \\ 0 & \omega_e L_m & R_r & \omega_e L_r \\ -\omega_e L_m & 0 & -\omega_e L_r & R_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{qs}^e \\ i_{ds}^e \\ i_{qr}^e \\ i_{dr}^e \end{bmatrix} \tag{16}$$

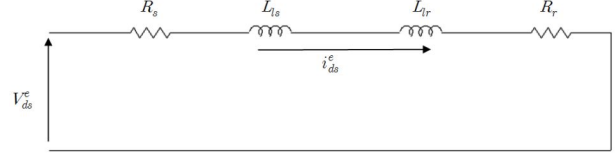


그림 3. 고주파 전압 인가 시 유도 전동기 등가회로
Fig. 3. Equivalent circuit of Induction motor in case of High frequency voltage supply.

동기속도 ω_e 로 회전하는 전동기의 단상여자 전류의 동기 좌표는 식 (17)과 같으며 $\Phi = \omega_e t$ 이다.

$$i_{qs}^e = \frac{I_s}{2} \sin 2\Phi$$

$$i_{ds}^e = \frac{I_s}{2} (1 - \cos 2\Phi) \tag{17}$$

식(16)에서 만약 $i_{qs}^e = 0$ 이고 $\omega_e^2 L_r^2 \gg R_r^2$ 라면 회전자 전류는 식(18)과 같다.

$$\begin{bmatrix} i_{qr}^e \\ i_{dr}^e \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{\omega_e L_m R_r}{R_r^2 + \omega_e^2 L_r^2} \\ -\frac{\omega_e L_m L_r}{R_r^2 + \omega_e^2 L_r^2} \end{bmatrix} i_{ds}^e \cong \begin{bmatrix} -\frac{L_m R_r}{\omega_e L_r^2} \\ -\frac{L_m}{L_r} \end{bmatrix} i_{ds}^e \tag{18}$$

식(16)에서 고정자 전압 전류 식은 식(19)와 같다.

$$\begin{bmatrix} V_{qs}^e \\ V_{ds}^e \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \omega_e (L_s L_r - L_m^2) \\ L_r \end{bmatrix} i_{ds}^e = \begin{bmatrix} \omega_e \sigma L_s \\ R_s + R_r \end{bmatrix} i_{ds}^e \tag{19}$$

식(19)에서 누설 인덕턴스는 식(20)과 같다.

$$\sigma L_s = \frac{V_{qs}^e}{\omega_e i_{ds}^e} \tag{20}$$

누설 인덕턴스도 고정자 저항을 구할 때와 마찬가지로 왜곡 전압의 영향을 제거하기 위해 두 번의 측정을 행하여 식(21)과 같이 구한다.

$$\sigma L_s = \frac{V_{qs1}^e - V_{qs2}^e}{\omega_e (i_{ds1}^e - i_{ds2}^e)} \tag{21}$$

4. 벡터 제어를 기준한 자화 인덕턴스 측정

자화 인덕턴스(L_m)는 무 부하 운전 시험을 통하여

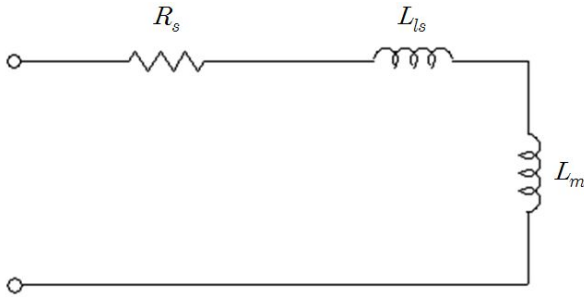


그림 4. 제로 슬립 운전시의 유도 전동기 등가 모델
Fig. 4. Equivalent circuit of Induction motor in case 0 slip operation.

측정할 수 있다. 만약 모터가 부하 없이 정격 전압에서 동작하고 기계적 마찰 부하를 무시한다면 전동기의 기계속도는 동기 속도와 같게 되어 슬립은 영이 된다. 따라서 회전자 임피던스는 무한대가되어 무 부하 측정 시 전동기 등가회로는 그림 4와 같다.

자화 인덕턴스는 식(22)와 같이 고정자 인덕턴스와 고정자 누설 인덕턴스의 차로 주어진다. 여기서 고정자 인덕턴스는 마찰 부하와 제로 슬립에 따른 전동기 감속 현상을 보상하기 위하여 전동기가 임의의 속도로 감속할 때까지의 누설 인덕턴스 값을 평균하여 식(23)과 같이 구한다.

$$L_m = L_s - L_{ls} \quad (22)$$

$$L_s = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N \frac{V_{qs_n}^e}{\omega_{en} i_{ds_n}^e} \quad (23)$$

5. 벡터 제어를 기준한 회전자 저항 측정

회전자 저항치는 회전자에 흐르는 전류의 주파수에 따라 변화하므로 정격 부하를 인가하여 회전자 저항을 측정한다. 고정자 입력 전압과 전류로부터 여자되는 모터의 여자 전압은 식 (24)와 같다.

$$V_m = V - (R_s + jX_{ls})I = (V_{ds}^e - jV_{qs}^e) - (R_s + jX_{ls})(I_{ds}^e - jI_{qs}^e) \quad (24)$$

그림 1에서 알 수 있듯이 여자 전류는 식(25)와 같다.

$$I_m = \frac{V_m}{jX_m} \quad (25)$$

식(24)와 (25)을 이용하여 회전자 임피던스와 회전자

저항을 구하면 다음 식(26), (27)과 같다.

$$Z_r = (R_r/S + jX_{lr}) = \frac{V_m}{I - I_m} \quad (26)$$

$$R_r = S \operatorname{Re}(Z_r) \quad (27)$$

따라서 회전자 저항은 정격 부하와 정격 슬립 상태 운전 시 여자 전류와 전압을 이용하여 구한다.

III. 실험

유도전동기는 3HP 4Pole 전동기를 사용하였으며 벡터 제어기는 DSP TMS320LF2406을 사용하여 구현하였다. 유도전동기의 정격은 표 1과 같고 제시한 정수 측정법에 의해 측정된 전동기 정수는 표 2와 같다.

그림 5는 여자전류 d축 전류지령치와 실제의 d축 전류를 나타내었다. ch1은 d축 전류 지령치이고 ch2는 실제 d축 전류치이다. 초기에 실제전류가 약간 변동이 있으나 전체적으로 깨끗하게 지령치를 추종하고 있으므로 보아 PI 여자 전류 제어기가 잘 동작하고 있음을 알 수 있다.

그림 6은 0rpm에서 250rpm 까지 속도를 증가 시켰을 때 모터속도 지령 치와 실제 모터속도를 나타낸 것

표 1. 유도전동기 정격
Table 1. Specification of Induction Motor.

SPEC	
전동기형	유도 전동기
정격용량	2.2kw
Pole수	4Pole
정격전압	220V
정격전류	20Arms
형 식	공냉식
결선방식	Y결선
정격RPM	1750rpm

표 2. 측정된 전동기 정수
Table 2. Measured Motor Parameters.

전동기 상수	실험 결과 값	수동 측정 값
R_s	0.565 Ω	0.525 Ω
σL_s	5.66 mH	5.85 mH
L_m	87.4 mH	85.5 mH
R_r	0.34 Ω	0.32 Ω

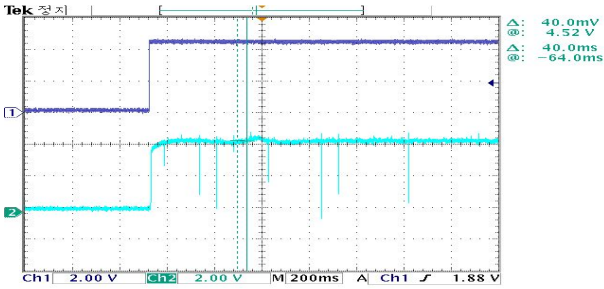


그림 5. 여자전류 지령치와 실제여자전류
 ch1: 여자전류 지령치,
 ch2: 실제 여자전류 치,(2V/2A)
 Fig. 5. d-side current command and real current.

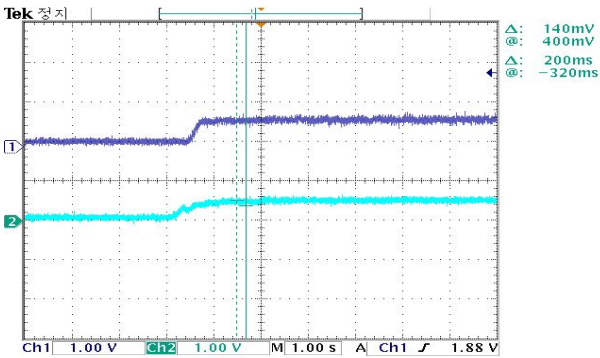


그림 6. 벡터제어시의 모터속도 지령치와 실제모터속도 (0rpm->250rpm)
 ch1: 모터속도 지령치,
 ch2: 실제 모터속도, (1V/500rpm)
 Fig. 6. Motor speed command and real speed in vector control(0rpm->250rpm).

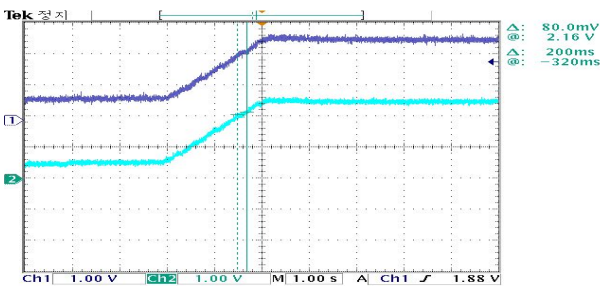


그림 7. 벡터제어시의 모터속도 지령치와 실제모터속도 (250rpm->1250rpm)
 ch1: 모터속도 지령치,
 ch2: 실제 모터속도,(1V/500rpm)
 Fig. 7. Motor speed command and real speed in vector control(250rpm->1250rpm).

이다. 모터의 저속 영역에서 실제 모터 속도가 속도 지령치에 비하여 약간의 지연된 응답특성을 보였으나 전체적으로 지령치를 잘 따라가고 있음을 알 수 있다. 이

파형으로 보아 저속 영역에서 제시한 전동기 정수가 잘 추정되어 벡터제어가 잘 되고 있음을 알 수 있다.

그림 7은 250rpm에서 1250rpm 까지 속도를 증가시켰을 때 모터속도 지령치와 실제 모터속도를 나타낸 것이다. 모터의 중·고속 영역에서 실제 모터 속도가 지령치를 아주 잘 따라가고 있음을 알 수 있다. 이 파형으로 보아 제시한 전동기 정수가 중·고속 영역에서도 잘 추정되어 벡터제어가 잘 되고 있음을 알 수 있다.

IV. 결 론

정확한 전동기 정수를 얻기 위한 정수 측정법을 제시하였으며 이를 적용하여 실험대상 전동기의 시정수를 구하였고 실제 실험을 통해 벡터제어가 저속과 중·고속 영역에서 잘 제어되고 있음을 확인하였다. 따라서 제시한 정수방법이 유도전동기의 정수 값을 정확히 추정할 수 있음을 확인하였다.

REFERENCES

- [1] Huang K, Wu Q, Turner D, “Effective identification of induction motor parameters based on fewer measurements.” IEEE Trans. Energy Conv., 2002,17(1),pp.69-76.
- [2] Proca A, Keyhani A, “Identification of variable frequency induction motor models from operating data.” IEEE Trans. Energy Conv., 2002. 17(1), pp. 24-31.
- [3] Laroche E, sedda E, Durieu C, “Methodological insights for online estimation of induction motor parameters.” IEEE Trans. Contr. Sys. Technol., 2008, 16(5), pp. 1021-1028.
- [4] Zaky M, Khater M, Shokralla S, Yasin H, “Wide speed range estimation with online parameter identification schemes of sensorless induction motor drives.” IEEE Trans. Ind. Electron, 2009, 56(5),pp.1699-1707
- [5] Jefremovic V, Vasic V, Marcetic D, “Speed-sensorless control of induction based on reactive power with rotor time constant identification.” IET Electr. Power Appl., 2010, 4(6), pp.462-473.
- [6] Boglietti A, Cavagnino a, Lazzari M, “Computational algorithms for induction motor equivalent circuit parameter determination-Part

- 1: resistances and leakage reactances.” IEEE Trans. Ind. Electron, 2011, 58(9), pp.3723-3733.
- [7] Lin W-M, Su T-J, Wu R-C, “Parameter identification of induction machine with a starting no-load low voltage test.” IEEE Trans. Ind. Electron, 2012, 59(1), pp. 352-360.

저 자 소 개



한 상 수(평생회원)
1985년 명지대학교 대학원
전자공학과 공학석사
1995년 홍익대학교 대학원
전자공학과 공학박사
1989년~현재 가천대학교 에너지
IT학과 교수

<주관심분야 : 지능 및 퍼지제어, 전력전자제어,
로봇시스템제어, 임베디드하드웨어 설계>