

유도전동기의 매개변수 측정과 토크 모니터링 시스템

김진우, 김규식, 권원태, 박진우
서울시립대학교

Parameter Measurement and Torque Monitoring System for Induction Motors

Jin-woo Kim, Gyu-Sik Kim, Won-Tae Kwon, Jin-Woo Park
University Of Seoul

ABSTRACT

The accurate identification of the motor parameters is crucially important to achieve high dynamic performance of induction motors. In this paper, the motor parameters such as rotor resistance, stator(rotor) leakage inductance, mutual inductance are measured for torque monitoring and indirect vector control. To demonstrate the practical significance of the results, some experimental results are presented.

1. 서론

유도 전동기는 가변속 운전을 위한 가변주파수 제어장치의 적지 않은 가격과 제어의 난이성 때문에 유지보수의 용이성과 내구성, 효율성, 경제성 등의 장점에도 불구하고 가변속 운전이 요구되는 분야에서는 크게 각광받지 못하였다. 그러나 최근의 전력전자 분야의 눈부신 발전에 따른 반도체 스위칭 소자의 개발과 DSP와 같은 고성능 마이크로 프로세서의 발달은 유도 전동기 구동시스템의 제어에 새로운 가능성을 열어 주었다. 유도전동기 제어방법으로는 V/F나 슬립제어와 같이 양의 크기만을 제어함으로써 평균 토크를 제어하는 스칼라제어가 있다. 이 방법은 토크의 평균값만을 제어하므로 순시적인 토크의 변동에 대한 응답이 느리고, 정상상태의 특성만이 결정된다. 스칼라 제어의 단점을 해결하기 위해 벡터 제어 방법을 개발한 이후 순시토크제어에 뛰어난 성능을 발휘하였다. 따라서, 제철소의 압연롤, 제지기계 및 빈번한 가감속운전을 요구하는 NC 공작기계등 많은 분야에 응용되어 오고 있다. 이에, 본 연구에서는 간접 벡터제어와 토크를 모니터링하는 시스템을 구축하여 토크의 변화를 감시하는 응용분야에 이용하고자 한다.

2. 속도와 토크를 추정하기 위한 유도전동기의 매개변수값 측정

2.1 유도전동기 매개변수의 측정

우선, 유도전동기의 누설인덕턴스를 측정한다. 누설 인덕턴스를 측정하는 방법으로 전동기 인버터의 입력단에 짧은 전압 펄스를 인가하는 방법을 사용하였다. 여기서 인가된 전압은 인버터의 스위칭에 의해 결정되고 그 크기 v_{ds}^{**} 는 직류링크전압이 V_{dc} 일 때 $\frac{2V_{dc}}{3}$ 로 주어진다. 이때 흐르는 전류를 과전류 검출레벨이하로 설정하면 전압인가 시간은 대개 수십 내지 수백 μsec 정도이다. 실제 500 - 1000 μsec 정도의 짧은 임펄스 형태의 전압을 d 축 고정자 전압 v_{ds}^{**} 에 가한 뒤 이때 흐르는 d 축 고정자 전류를 측정하여 누설 인덕턴스를 구할 수 있다. 이렇게 짧은 임펄스 형태의 전압을 d 축 고정자 전압 v_{ds}^{**} 에 가하면 dead time 효과에 의한 전압 V_{ds}^s 은 거의 무시할 수 있고 따라서 그림 1과 같이 간략화 될 수 있다.

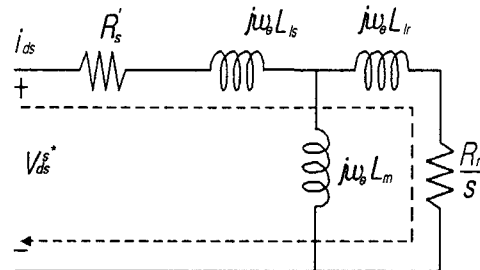


그림 1 L_s (L_{lr}) 측정을 위한 간략화된 모델
Fig. 1 Simplified model for L_s (L_{lr}) measurement

이렇게 짧은 시간동안 회전자 속도는 0 이고 그림 1에서 $s = 1$ 로 간주된다. 또한, $j\omega_e L_m$ 에 의한 임피던스에 비해 $j\omega_e L_{lr} + R_r$ 에 의한 임피던스가 상대적으로 크게 작아 그림 1에서 $j\omega_e L_m$ 부분을 무시하여 수식을 전개하면 식 (1)과 같다.

$$v_{ds}^{s*} = (R_s + R_r) i_{ds} + (L_k + L_{lr}) \frac{di_{ds}}{dt} \quad (1)$$

식 (1)에서 짧은 임펄스 형태의 전압을 d 축 고정자 전압 v_{ds}^{s*} 에 가하였기 때문에 $(R_s + R_r) i_{ds}$ 항에 비해 $(L_k + L_{lr}) \frac{di_{ds}}{dt}$ 항이 상대적으로 훨씬 크다. 따라서, 수식의 간단한 정리를 위해 식 (1)은 식 (2)와 같이 간략화 될 수 있다.

$$v_{ds}^{s*} \cong (L_k + L_{lr}) \frac{di_{ds}}{dt} \quad (2)$$

한편, 고정자 및 회전자 누설인덕턴스 L_k, L_{lr} 는 온도의 변화에 무관하지만 자속과 주파수에 따라 변한다. 일반적으로 상호인덕턴스 L_m 에 비해 무척 작은 값을 갖는다. 또한, L_k 와 L_{lr} 가 같다고 보면 식 (2)에서 다음 식 (3)을 얻을 수 있다.

$$L_k = L_{lr} \cong \frac{v_{ds}^{s*}}{2 \frac{di_{ds}}{dt}} \quad (3)$$

두 번째로, 상호인덕턴스 L_m 을 측정한다. L_m 은 여자 전류에 따라 비선형성을 나타내고 자기포화에 따라 상호 인덕턴스가 변동하면 실제 자속기준이 변하고 간접 벡터제어의 경우 전동기 슬립주파수의 오차를 유발하게 된다. 특히 단위 전류당 전동기 토크를 순간적으로 최대화하기 위하여 인버터에 의해 제한되는 전체 고정자 전류를 토크 성분전류로 인가하는 경우나 효율제어를 하는 경우에는 반드시 여자전류에 따른 상호 인덕턴스의 자화 특성을 고려해 주어야한다. 유도 전동기를 무부하 상태에서 스칼라 제어를 하면 전동기는 거의 동기속도로 회전하게 된다. 따라서, s 는 거의 0 이고 슬립속도 ω_s 는 굉장히 작다. 왜냐하면 토크가 작기 때문이다. 따라서, 그림 1의 $\frac{R_r}{s}$ 는 거의 무한대가 되어 오른쪽 회전자 부분은 개방상태가 된다. dead time효과에 의한 전압 V_{ds}^s 을 무시하면 그림 1은 다음 그림 2와 같이 간략화 된다.

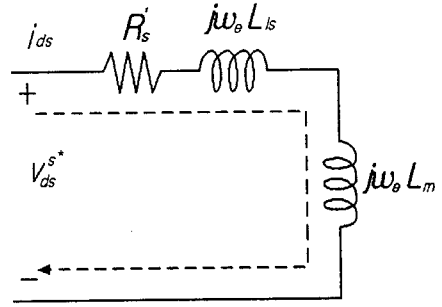


그림 2 L_m 측정을 위한 간략화된 모델
Fig. 2 Simplified model for L_m measurement

따라서, 다음과 같은 동적 방정식을 얻을 수 있다.

$$v_{ds}^{s*} = R_s i_{ds} + j\omega_e (L_k + L_m) i_{ds} \quad (4)$$

식 (4)에서 정격전압과 정격주파수를 인가한 경우, R_s 에 의한 전압강하는 $\omega_e (L_k + L_m)$ 에 의한 전압강하에 비해 무척 작으므로 식 (4) 는 다음과 같이 간략한 식으로 나타낼 수 있다.

$$v_{ds}^{s*} \cong j\omega_e (L_k + L_m) i_{ds} \quad (5)$$

q 축에 대해서도 같은 방식으로 정리하면 다음과 같다.

$$v_{qs}^{s*} \cong j\omega_e (L_k + L_m) i_{qs} \quad (6)$$

식 (5) 와 (6) 으로부터 다음 식을 얻을 수 있다.

$$L_m \cong \frac{\sqrt{(v_{ds}^{s*})^2 + (v_{qs}^{s*})^2}}{\omega_e \sqrt{i_{ds}^2 + i_{qs}^2}} - L_k \quad (7)$$

마지막으로, 회전자 역시상수 $K_s (= \frac{R_r}{L_r})$ 를 측정한다. 유도전동기의 동기 좌표계에서의 전압방정식은 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$\begin{aligned} v_{ds} &= R_s i_{ds} + \frac{d\lambda_{ds}}{dt} - \omega_e \lambda_{qs} \\ v_{qs} &= R_s i_{qs} + \frac{d\lambda_{qs}}{dt} + \omega_e \lambda_{ds} \\ 0 &= R_r i_{dr} + \frac{d\lambda_{dr}}{dt} - (\omega_e - \omega_r) \lambda_{qr} \\ 0 &= R_r i_{qr} + \frac{d\lambda_{qr}}{dt} + (\omega_e - \omega_r) \lambda_{dr} \end{aligned} \quad (8)$$

또한, 회전자와 고정자 자속 방정식은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned}\lambda_{ds} &= L_s i_{ds} + L_m i_{dr} \\ \lambda_{qs} &= L_s i_{qs} + L_m i_{qr} \\ \lambda_{dr} &= L_m i_{ds} + L_r i_{dr} \\ \lambda_{qr} &= L_m i_{qs} + L_r i_{qr}\end{aligned}\quad (9)$$

전기적 역시상수는 회전자 자속에 의해 발생한 과도 상태 전동기 단자전압에 의해 측정된다. 위의 식 (8) 과 식 (9)의 세번째 식들에서 다음의 식 (10)을 얻을 수 있다.

$$\frac{d\lambda_{dr}}{dt} = R_r \frac{L_m}{L_r} i_{ds} - \frac{R_r}{L_r} \lambda_{dr} + (\omega_e - \omega_r) \lambda_{qr} \quad (10)$$

q축의 회전자 자속을 0으로 놓고 식 (8), (9), (10)을 이용하면 다음과 같은 전압방정식 (11)를 구할 수 있다.

$$\begin{aligned}v_{ds} &= (R_s + R_r \frac{L_m^2}{L_r^2}) i_{ds} + L_\sigma \frac{di_{ds}}{dt} \\ &\quad - \omega_e L_\sigma i_{qs} - R_r \frac{L_m}{L_r} \lambda_{dr}\end{aligned}\quad (11)$$

여기서 전류제어 시스템이 가동된다고 가정한다. 고정자 d축 전류 명령치 i_{ds}^* 는 일정하게 하고 토크 전류인 고정자 q축 전류 명령치 i_{qs}^* 는 일정한 주기마다 구형과 펄스가 되게 한다. 한편, 구형과 펄스가 아닌 구간에서는 고정자 전압 d축 방정식은 다음 식 (12)와 같이 표현된다.

$$v_{ds} = R_s i_{ds}^* + \Delta v_{ds} \quad (12)$$

여기서, 식 (12)의 Δv_{ds} 는 K_s ($= \frac{1}{T_r} = \frac{R_r}{L_r}$) 가 정확치 않을 때 생긴다. K_s 가 정확하면 Δv_{ds} 는 0이 된다. 회전자 자속과 K_s , 그리고 Δv_{ds} 의 관계를 이용하여 유도전동기의 전기적 시상수를 비교적 정확히 측정할 수 있음을 보여준다. 본 측정방식은 구형과 펄스가 주입되는 순간 상당한 고주파전류가 회전자축에 흘러 표피효과로 인한 회전자 저항이 크게 평가되는 단점이 있다.

2.2 간단한 토크의 추정

동기좌표계에서, 발생된 토크 T_e 는 다음 식 (13)과 같다.

$$T_e = \frac{3}{2} \frac{p}{2} \frac{L_m}{L_r} (\lambda_{dr} i_{qs} - \lambda_{qr} i_{ds}) \quad (13)$$

여기서 p 는 극수이다. 간접벡터방식을 채용함으로써 회전자 q축 자속 λ_{qr} 을 0으로 제어하면 식 (13)에서 추정된 토크는 식 (14)와 같게 된다.

$$T_e = \frac{3}{2} \frac{p}{2} \frac{L_m}{L_r} \widehat{\lambda}_{dr} i_{qs} \quad (14)$$

고정자 q축 전류 i_{qs} 는 상전류를 측정하여 d-q 변환시키면 되고 회전자 d축 자속 $\widehat{\lambda}_{dr}$ 은 다음 식 (15)로 추정한다.

$$\frac{d}{dt} \widehat{\lambda}_{dr} = -\frac{R_r}{L_r} \widehat{\lambda}_{dr} + L_m \frac{R_r}{L_r} i_{ds} \quad (15)$$

3. 실험 및 결과

실험은 DSP chip인 TMS320C31을 이용하여 구현하였고 실험에 사용된 전체 시스템의 구성도를 그림 3에 나타내었다.

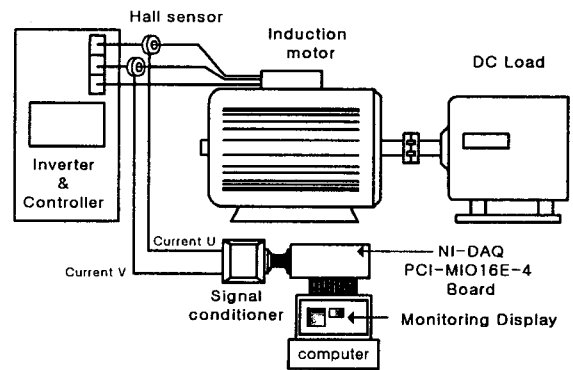
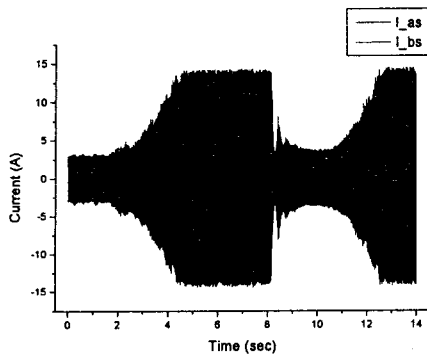


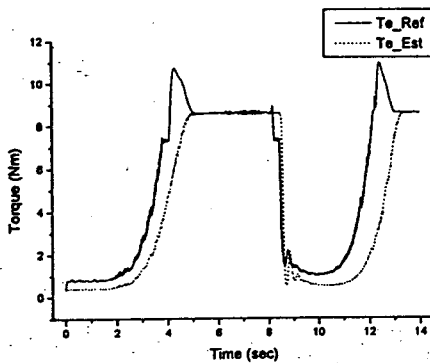
그림 3 유도전동기 토크 모니터링 시스템
Fig. 3 Torque monitoring system for induction motors

유도전동기는 프랑스 Leroy Somer 제품인 7.5kW 급 LS-VMV132M로 1800rpm의 정격속도를 갖고 있고 1024pulse/rev 엔코더가 내장되어 있다. DC brake 부하 시스템이 커플링되어 있다.

우선, 고정자 (회전자) 누설 인덕턴스 L_k (L_{lr}) 는 800 μ sec 정도의 짧은 임펄스 형태의 전압을 d축 고정자 전압 v_{ds}^{**} 에 가한 뒤 이때 흐르는 d축 고정자 전류를 측정하여 누설인덕턴스를 구하였다. 이렇게 구한 누설인덕턴스가 0.0015 [H] 이었다.



(a) 상전류



(b) 토크 기준값과 추정치 비교

그림 4 1000rpm으로 운전시 토크 모니터링
Fig. 4 Torque monitoring with rotor speed of 1000rpm

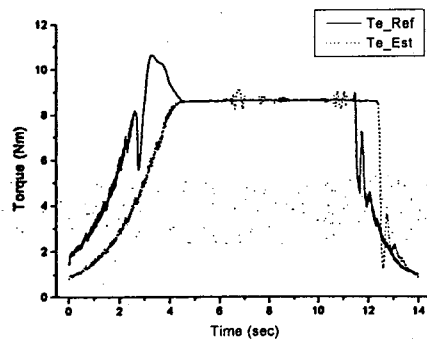


그림 5 1500rpm으로 운전시 토크 모니터링
Fig. 5 Torque monitoring with rotor speed of 1500rpm

두 번째로, 상호 인덕턴스 L_m 은 무부하 상태에서 스칼라제어를 하면서 식 (7) 로부터 구하였고 이는 0.044 [H] 이었다. 세 번째로, $L_s = L_r$ 라고 가정하고 전기적

역시상수 K_s ($= \frac{1}{T_r} = \frac{R_r}{L_r}$)로부터 회전자 저항을 구하였다. 0.188 [Ω] 이었다.

마지막으로, 토크 모니터링 시스템에 대한 실험을 행한다. 전동기속도가 1000rpm 과 1500rpm 으로 각각 운전하며 부하를 가변하면서 실험한 결과가 그림 4와 그림 5에 있다.

4. 결 론

본 논문은 실용적으로 사용할 수 있는 간접벡터제어의 구현과 토크 모니터링 시스템을 실현하였다. TI사의 TMS320C31 DSP chip을 이용하여 공간 전압 벡터 PWM을 실현하고 유도전동기 매개변수 측정에 관한 실험을 수행하였다. 먼저, 오프라인으로 벡터제어에 필요한 매개변수들을 측정하였고 이를 이용하여 간접벡터제어와 토크의 추정을 행하였다. 이 연구결과가 제철소의 압연 롤, 제지기계 및 빈번한 가감속운전을 요구하는 NC 공작기계등 많은 분야에 응용되기를 희망한다.

이 논문은 2000년도 중소기업청의 산학연 공동기술개발 컨소시엄과제 연구결과의 일부입니다.

참 고 문 헌

- [1] Takayoshi Matsuo and Thomas A. Lipo " A rotor parameter identification scheme for vector-controlled induction motor drives," *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. IA-21, No. 4, May/June, pp. 624~632, 1985.
- [2] Julio C. Moreira and Thomas A. Lipo, "A new method for rotor time constant tuning in indirect field oriented control," *IEEE-IAS Ann. Meet. Conf. Rec.*, pp. 573~580, 1990.
- [3] Jong-Woo Choi, Sung-Il Yong, and Seung-Ki, Sul, " Inverter Output Voltage synthesis Using Novel Dead Time Compensation, " *IEEE Applied Power Electronics Conf.*, pp. 100~106, 1994.
- [4] A. Khambadkone and J. Holtz "Vector-Controlled Induction Motor Drive with a self-Commissioning Scheme," *IEEE Transaction on Industrial Electronics*, Vol. 38, No.5, pp. 322~327, Oct., 1991.
- [5] Young-Dae Kim, Gyu-Sik Kim, Joon-Hwa Lee and Ju-Yeop Choi, "Study on the rotor resistance adaptation algorithm for induction motors," *International Workshop on Advanced Mechatronics*, pp. 254~259, Dec., 1997.