

## 고정밀 토크제어를 위한 인버터 구동 유도전동기의 상수 측정

이진우

두원공과대학 자동화시스템과

### Measuring machine parameters of inverter-fed induction motors for an accurate torque control

Jin-Woo Lee

Dept. of Automation Systems, Doowon Technical College, jinwoo@doowon.ac.kr

#### ABSTRACT

This paper deals with the measurement of machine parameters of inverter-fed induction motors for an accurate torque control applications such as machine tools and tension control machines. After discussing nonlinearities of both inverter and motor, this paper suggests appropriate compensation and measurement methods. The experimental results show the validity of the proposed method in the operating conditions.

#### 1. 서 론

벡터제어방식을 적용한 유도전동기 구동시스템이 상품화되어 사용되고 있는 수준으로 기술이 발전하였으나, 유도전동기의 제어성능을 향상시키기 위한 연구는 계속되고 있다. 특히 고성능 토크제어를 필요로 하는 장력제어, 고성능 서보 등에 사용되는 유도전동기 구동시스템에서 토크지령을 어느 정도 정밀하게 구현하느냐가 제어성능 및 제품의 경쟁력을 결정하는 중요한 요인이 된다.

벡터제어방식 중에서 계산된 슬립 각속도를 회전자 속도에 더하여 간접적으로 자속의 각속도를 구하는 간접벡터제어가 구현이 쉽기 때문에 먼저 실용화되어 사용되고 있다. 한편, 최근에는 전동기의 전압, 전류, 속도 정보 등을 이용하여 자속을 추정하여 제어하는 직접벡터제어 방식도 실용화되고 있다. 이러한 벡터제어 방식을 적용한 유도전동기 토크제어의 최종적인 연구목표는 전동기의 다양한 운전조건에서 정밀한 토크제어를 실현하는 것이다. 이를 위해서는 전동기 구동시스템을 이해하고, 오차의 원인을 규명하며, 적절한 오차제거방법을 연구하는 것이 필요하다.

최근 연구가 활발히 진행되고 있는 직접벡터제어 방식의 자속추정은 역기전력이 큰 고속영역에서는 전압모델의 특성이 우수하고, 저속에서는 전류모델의 특성이 우수하므로 저속에서는 전류모델을 사용하고, 고속에서는 전압모델을 사용하여 자속을 추정하는 것이 바람직하다[2]. 그러나, 추정된 자속의 정밀도는 각각의 모델에 사용되는 전동기 상수, 전압, 전류 등의 정밀도에 영향을 받기 때문에 이의 영향을 최소화하기 위한 연구가 계속되고 있다 [2][3]. 인버터의 데드타임, 전압강하 등의 비선형성을 고려하여 출력전압의 크기를 정밀하게 구현하고자 하는 연구[4], 인버터의 스위칭 특성을 고려하여 전류의 평균치를 정밀하게 측정하고자 하는 연구, 전동기의 다양한 운전조건에 따라 변동하는 전동기의 상수를 정밀하게 구하고자 하는 연구 등이 진행되고 있다[1].

본 논문에서는 유도전동기의 정밀한 토크제어를 위하여 인버터의 데드타임, 전압강하, 스위칭 특성에 따른 비선형성을 검토하고, 출력전압을 정밀하게 구현할 수 있는 방법과 전동기 운전조건에 맞는 상수 측정방법을 제시하고, 실험을 통하여 제안한 방법의 유효성을 보이고자 한다.

#### 2. 인버터의 비선형성 특성 보상

그림 1에 나타난 3상 유도전동기를 구동하는 3상 PWM 인버터는 전압지령에 따라서 출력전압을 정확하게 구현하여야 하지만, 인버터를 구성하는 IGBT 및 역병렬 다이오드의 전압 강하, 스위치의 턴-온 및 턴-오프 지연 시간, 스위치 턴-온과 턴-오프 사이의 데드 타임(dead time) 등으로 인해 전압제어 오차가 발생한다.

가. 인버터를 구성하는 IGBT 및 역병렬 다이오드의 전압 강하

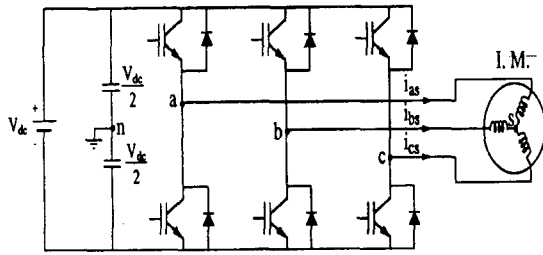


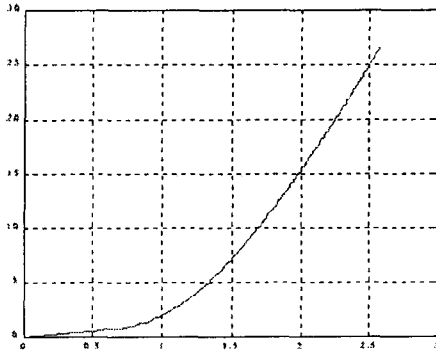
그림 1 유도전동기 구동 3상 PWM 인버터  
Fig. 1 3-phase PWM inverter-fed induction motor

식 (1)은 소자의 전압강하를 근사화하여 나타낸 것이다.

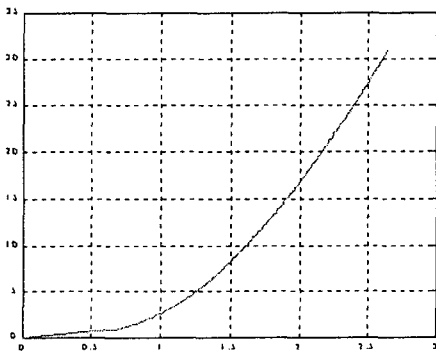
$$\begin{aligned} V_{ce} &= V_{ceo} + r_{ce} I \\ V_d &= V_{do} + r_d I \end{aligned} \quad (1)$$

여기서  $V_{ceo}$ 와  $V_{do}$ 는 각각 스위칭소자와 다이오드의 문턱전압(threshold voltage)이고,  $r_{ce}$ 와  $r_d$ 는 각각 스위칭소자와 다이오드의 온-상태 기울기 저항(on-state slope resistance)이다.

한편 이들 값은 각각 소자의 온도와 전류에 따라서 변하는 특성을 나타낸다.[4] 소자의 문턱전압



(a) IGBT의 Vce-I 특성 곡선(5A/div, 0.5V/div)



(b) Diode의 Vd - I 특성 곡선(5A/div, 0.5V/div)

그림 2 소자의 전압-전류 특성 ( $T_j = 125^\circ\text{C}$ )  
Fig. 2 Device voltage-current characteristics ( $T_j = 125^\circ\text{C}$ )

은 온도에 따른 영향을 고려하여 실제 사용온도와 같은 온도를 설정하고, 설정된 온도에서 데이터북을 참조하여 문턱전압을 구하며, 전류극성에 따라 소자의 문턱전압을 보상한다. 소자의 저항 성분은 온도 및 전류에 따라 변화하지만, 근사적으로 일정한 저항으로 모델링하여 보상하며, 소자의 저항이 고정자 저항을 측정할 때 같이 측정되므로 고정자 저항에 포함하여 보상한다. 그림 2는 실험에 사용한 소자의 전압-전류 특성이며, 두 구간으로 근사화 하여 다음과 같이 전압강하를 보상하는데 이것은 전류가 작은 경우에 저항값이 상대적으로 크기 때문이다.

IGBT 전압강하 보상

$$\begin{aligned} V_{ceo} &= 0.87[\text{V}] & I > 1.17[\text{A}] \\ V_{ce} &= I \cdot 0.95 / 1.17[\text{V}] & I \leq 1.17[\text{A}] \end{aligned}$$

다이오드 전압강하 보상

$$\begin{aligned} V_{do} &= 0.8[\text{V}] & I > 1.43[\text{A}] \\ V_d &= I \cdot 0.92 / 1.43[\text{V}] & I \leq 1.43[\text{A}] \end{aligned}$$

#### 나. 소자의 턴-온 및 턴-오프 지연 시간

전력용 반도체 소자의 스위칭 특성은 소자특성, 게이트 구동회로, 직류전압, 소자전류, 회로 요소, 온도 등에 따라서 복합적으로 결정되므로 해석적으로 다루기는 어렵다. 따라서 실제 사용환경과 같은 조건에서 실험을 통하여 특성을 얻는 것이 필요하다. 다만, 소자의 스위칭 시간이 전류크기에 따라 크게 변하므로 소자전류에 따른 게이트 신호와 소자의 스위칭 전압을 측정하여 지연시간을 구한다. 이와 같이 구한 턴-온 및 턴-오프 지연 시간은 소프트웨어적으로 독립적으로 보상하도록 구현하는 것이 바람직하다. 즉, 출력전압값으로부터 구한 게이트 신호의 동작시간을 전류극성에 따라 지연시간만큼 보정하여 출력함으로써 스위칭 특성에 따른 비선형성을 보상한다. 그림 3은 소자의 스위칭 시간을 나타낸 것이며, 실험 결과를 최소화방법으로 근사화한 수식은 각각 다음과 같다.

(a) Turn-On delay Time,  $T_{on}$

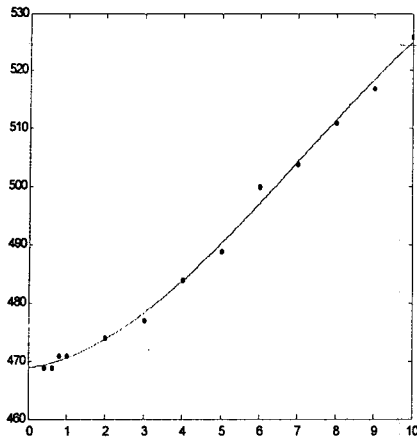
$$T_{on} = 469 + 0.883 I + 0.884 I^2 - 0.041 I^3 \quad [\text{ns}] \quad (2)$$

(b) Turn-Off delay Time,  $T_{off}$

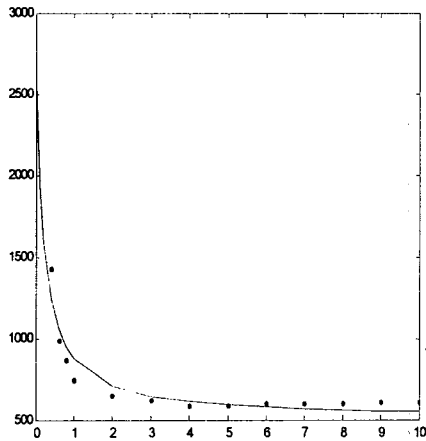
$$T_{off} = 508.6 + \frac{457.9}{0.22 + I} \quad [\text{ns}] \quad (3)$$

#### 다. 스위치 턴-온과 턴-오프 사이의 데드 타임

전압형 인버터는 암(arm)단락을 방지하기 위하여 스위치의 턴-온과 턴-오프 사이에 데드 타임을 둔다. 데드 타임 동안의 출력전압은 소자의 특성, 전압, 전류, 회로 요소, 온도 등에 따라서 복합적으



(a) Turn-On delay Time(10ns/div, 1A/div)



(b) Turn-Off delay Time(500ns/div, 1A/div)

그림 3 전류에 따른 소자의 스위칭 지연시간  
Fig. 3 Device switching delay time at different currents

로 결정되므로 스위칭에 따른 부분은 (나)의 방법으로 보상한다. 그리고, 데드 타임은 게이트 신호 발생회로에서 정한 시간만큼 전류부호에 따라 보상한다.

위와 같은 방법으로 인버터의 비선형 특성을 보상하였으나, 앞에서 언급한 바와 같이 각각의 특성을 이상적으로 모델링하는 데는 한계가 있으므로 어느 정도의 전압제어오차는 피하기 어렵다.

### 3. 3상 유도 전동기의 특성 및 상수 측정

그림 4에 나타낸 3상 유도전동기의  $\Gamma^{-1}$ 형 등가회로는 전동기 상수가 4개이고, 고정자 과도 인덕턴스를 직접 측정할 수 있으므로 T형 등가회로와 비교하여 전동기 상수 측정 면에서 유리하다.[5] 이와 같은 등가회로의 전동기 상수는 전동기의 동작조건인 온도, 자속크기, 주파

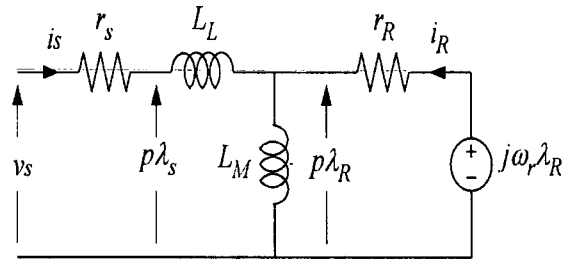


그림 4 유도전동기의  $\Gamma^{-1}$ 형 등가회로  
Fig. 4  $\Gamma^{-1}$  type equivalent circuit of the induction machine

수, 부하에 따라서 변동하기 때문에 이러한 조건을 고려하여 상수를 측정 및 보상하는 것이 필요하며, 유도전동기 상수의 특성은 다음과 같다.

- \* 고정자 및 회전자 온도 증가에 따른 저항 값( $R_s$ ,  $R_r$ )의 증가
- \* 자속에 따른 여자 인덕턴스의 변화
- \* 부하전류에 따른 자기회로의 특성변화로 여자 인덕턴스 변화[5]
- \* 주파수와 자속에 따른 철손의 변화

본 논문에서는 위와 같은 전동기 특성을 고려하여 전동기 상수를 측정하고자 하며, 다만 철손과 온도에 따른 저항 변동은 없는 것으로 가정한다.

#### 가. 고정자 저항 측정

그림 4의  $\Gamma^{-1}$ 형 등가회로에서 고정자 저항은 직류전류를 인가하여 측정할 수 있다. 그러나, 인버터 구동 유도전동기에서는 인버터의 비선형성에 의한 전압제어 오차와 전류측정 오차를 고려하는 것이 필요하다. 즉, 정밀한 저항 계산치를 얻기 위해서는 정밀한 전압과 전류 정보를 얻을 수 있는 방법이 요구되기 때문에 먼저 인버터의 비선형성을 보상하고, 전류 측정 오차를 제거한 후에 고정자 저항을 측정하는 것이 필요하다. 인버터의 비선형성 보상오차의 영향을 줄이기 위해서는 서로 다른 두 개의 동작 점에서 전류와 전압을 측정해서 식 (4)와 같이 고정자 저항을 계산한다.[1] 이렇게 구한 고정자 저항은 앞에서 언급한 바와 같이 전력용 반도체 소자의 저항성분을 포함한다.

$$r_s = \frac{V_{sa} - V_{sb}}{I_{sa} - I_{sb}} [\Omega] \quad (4)$$

그림 2의 소자의 전압-전류 특성과 그림 3의 소자의 스위칭 지연시간 특성을 고려하여 전류크기에 따른 영향을 줄일 수 있도록 전류크기는 정격전류의 (100%, 60%) 또는 (90%, 50%) 정도의 두 전류를 이용하여 저항 값을 측정한다. 이 때 각각 전압 및 전류는 일정 시간 적분한 후 시간 평균하여 사

용함으로써 노이즈 등에 의한 오차를 줄이도록 한다. 아울러 측정시 고정자 권선의 온도를 측정하여 운전상태에서 온도변화에 대한 저항 변동을 보상하는 데 사용될 수 있도록 한다.

#### 나. 고정자 과도 인덕턴스 측정

그림 4의 등가회로를 이용하여 고정자 과도 인덕턴스를 측정할 수 있다. 고주파 전압에 대한 여자 인덕턴스의 임피던스는 매우 크기 때문에 고주파 전류는 대부분 회전자축으로 흐르게 된다. 이에 따라 고주파수의 고정자 전류에 대한 전압 방정식은 고정자 및 회전자 저항과 과도 인덕턴스에서의 전압강하로 나타낼 수 있으며, 고주파 성분에 대한 무효전력을 구하여 과도 인덕턴스를 계산한다.[1] [1]의 경우는 전동기가 정지된 상태에서 고주파 단상 전압을 인가하기 때문에 전동기의 자속 크기가 운전상태와 다르게 되어 측정값에 오차를 수반하게 된다. 또한 운전 중에 자속성분 전류에 고조파 전류를 인가하는 경우는 B-H곡선 상에서 자속이 큰 포화영역 근처의 상수 값을 측정하게 된다. 그러므로 실제와 같은 자속 크기 상태에서 과도 인덕턴스를 측정하기 위해서는 여자전류에 상응하는 직류 d축 전류를 인가한 상태에서 q축 고주파 전류를 인가하는 것이 필요하다. 단, 이 때는 발생하는 고주파 토크에 의해 전동기가 진동하여 측정오차를 유발하므로 구속시험과 같이 전동기를 구속하여야 한다. 여자전류는 무부하 운전 상태의 고정자 전류로부터 구한 값을 사용한다.

q축 고주파 전류로부터 과도인덕턴스는 다음과 같이 계산한다.

$$Q_h = V_{Qh} I_{Dh} - V_{Dh} I_{Qh} \quad (5)$$

$$L_L = \frac{Q_h}{\omega_h (I_{Dh}^2 + I_{Qh}^2)} \quad (6)$$

여기서 각각의 전압과 전류는 고주파 성분에 대한 DQ축 성분이다.

#### 다. 정격 여자전압 계산 및 여자 인덕턴스 측정

전동기의 정격 여자전압은 정격 조건에서 발생하며, 전동기의 명판 사양과 측정된 고정자 저항과 과도 인덕턴스를 이용하여 다음과 같이 정격 여자전압을 계산한다.

$$V_m = (V_s - r_s I_D + X_L I_Q)^2 + (-r_s I_Q - X_L I_D)^2 \quad (7)$$

여기서 전류는 전압을 기준 페이서로 한 DQ축 성분이다.

정격 주파수 3상 전압을 고정자에 인가하면서 여

자전압을 계산하여 정격 여자전압이 되도록 인가 전압을 조정한다.[1] 정격여자 전압에서 계산한 여자전류는 무부하 상태에서 측정된 값이므로 무부하 여자전류가 된다. 왜냐하면 부하 상태에서는 회전자 축의 자기저항이 증가하여 여자 인덕턴스가 감소하는 현상이 발생하기 때문이다.[5] 정격 여자 전압과 전류, 주파수를 이용하여 무부하 여자 인덕턴스는 식 (8)과 같이 계산한다.

$$L_M = \frac{V_m}{\omega_e I_m} \quad (8)$$

#### 라. 회전자 저항 및 여자 인덕턴스 측정

전동기에 정격 여자전류 크기의 직류전류(d축)를 인가한 상태에서 d축에 교류 전류를 인가한다.  $\Gamma^{-1}$ 형 등가회로로부터 회전자축 소비전력과 여자전압을 구하고, 이를 이용하여 회전자 저항을 계산한다.[1]

한편, 정상상태에서  $\Gamma^{-1}$ 형 등가회로로부터 고정자 저항과 과도 인덕턴스를 이용하여 자속분 전류(여자전류)와 토크분 전류를 구하고, 식 (8)을 이용하여 여자 인덕턴스를 계산하며, 회전자 저항을 슬립을 이용하여 식 (9)와 같이 계산한다.

$$r_R = \omega_{sl} L_m \frac{I_m}{I_t} \quad (9)$$

정상상태에서 토크분 전류에 따른 여자 인덕턴스를 위와 같이 측정하여 회전자 축의 자기저항 변화에 따른 영향을 보상할 수 있다. 또한 회전자 저항을 위와 같이 구하고, 온도 모델을 이용하여 계산한 저항과 비교하여 온도 모델을 보정할 수 있다.

## 4. 실험 결과

3상 인버터 구동 유도전동기 시스템의 제어부분은 TI사의 DSP(TMS320C31, 60MHz)를 이용하여 구현하고, 인버터 부분은 Fairchild 반도체사의 SPM(FPAL 20SM60, 600V, 20A)을 이용하여 제작하였다. A/D를 통하여 직류 전압과 전동기 전류를 측정하고, 1024ppr의 엔코더를 이용하여 전동기 속도를 측정한다. 제안한 방법을 이용하여 측정된 결과는 표 1과 같다.

표 1 전동기 상수 측정값

Table 1 Measured values of motor parameters

$r_s = 1.28 [\Omega]$	$L_L = 3.6 [\text{mH}]$
$L_M = 220 [\text{mH}]$	$r_R = 0.66 [\Omega]$

## 5. 결 론

본 논문에서는 전동기의 토크제어 정밀도를 향상 시키기 위하여 인버터의 비선형성을 보상하는 방법을 제시하고, 전동기의 상수를 실제 운전 상태와 같은 조건에서 측정하기 위한 과도인덕턴스 측정법을 제안하였으며, 정상 운전 상태에서  $\Gamma^{-1}$ 형 등가 회로를 이용하여 전동기의 여자 인덕턴스와 회전자 저항을 측정하는 방법을 제안하였다. 또한 이를 통하여 부하에 따라서 변하는 여자 인덕턴스를 측정할 수 있도록 하였다. 실험을 통하여 제안한 방법의 타당성을 보였다. 향후 전동기의 상수에 대한 자세한 연구 및 실험이 필요할 것으로 사료된다.

## 참 고 문 헌

- [1] 김경서, 강기호, "센서리스 벡터제어를 위한 유도전동기 상수의 자동 측정", 전력전자학회 논문지, 제5권, 제6호, pp.552~559, 2000.
- [2] Jang-Hwan Kim, Jong-Woo Choi, and Seung-Ki Sul, "Novel rotor flux observer using observer characteristic function in complex vector space for field orientated induction motor drives", APEC2001, vol. 1, pp.615~621, 2001.
- [3] R. Wieser, "High dynamic torque calculator for inverter-fed induction machines", EPE'95, pp.3.771~3.776, 1995.
- [4] 최종우, 설승기, "새로운 데드타임보상법을 이용한 인버터 출력전압의 합성", 전기학회 논문지, pp.453~459, 1995.
- [5] R. Wieser, A. Lechner "The influence of rotor hysteresis effects on space phasor models of induction machines", International Conference on Electrical Machines, IECM'96, pp.119~124, 1996.

본 논문은 산업자원부에서 시행한 전력산업  
연구개발사업의 기술개발 결과임 (관리번호 01  
- 018)