

산업현장에서 벡터제어용 유도전동기의 오프라인 파라미터 추정

권병기, 박가우, 신원창, 조용상, 이진섭, 최창호
(주)포스콘 기술연구소

Off-line Parameter Estimation of Induction Motors for Vector Control in Industrial Field

Byung-Ki Kwon, Ga-Woo Park, Won-Chang Shin, Eung-Sang Cho, Jin-Seop Lee,
Chang-Ho, Choi
POSCON Coporation R&D Center

Abstract

Parameter estimation of induction motor for vector control presented in this paper can be easily implemented and applied to inverters in the industrial field, because it needs no additional hardware such as voltage sensor and measuring equipment. At first, the stator resistance including switching loss of inverter is measured by simple voltage-current equation. Next, in pre-magnetization of machine by imposing the d-axis constant field-current, q-axis torque current is forced to the machine until its speed feedback reaches to pre-defined level of speed limit. At this time, we can measure the rotor time-constant by decreasing the distorted output-voltage of inverter. At last, stator inductance, transient inductance, and moment of inertia can be measured by the relationship of output voltage, output torque and speed feedback. The validity and usefulness of this method is verified by experimental results.

1. 서론

오늘날 산업현장에서 벡터제어 알고리즘을 적용한 유도전동기는 고성능의 토크제어가 요구되는 영역으로 그 이용범위가 점차 확대되고 있다. 이러한 고성능의 구현은 벡터제어가 제대로

될 때 가능하며 이를 위해서는 전동기의 파라미터를 정확히 구하는 것이 매우 중요하다. 이 파라미터들은 가장 간단하게는 모터에 부착된 명판이나 제조업체에서 제공하는 데이터들로부터 얻을 수 있고, 무부하시험이나 구속시험과 같은 고전적인 방법으로도 구할 수 있지만 이렇게 구한 값들은 실제 운전시의 값들과 많은 차가 있으므로 고성능의 토크제어가 요구되는 분야에 적용하기는 쉽지 않다.[1] 실제로 고성능의 토크제어가 요구되는 산업현장에서는 전동기 단독시험과 같은 별도의 파라미터 설정기간이 주어지므로 산업현장의 조건을 고려하여, 구현이 간단하고 오차에 대한 민감도가 높으며 인버터가 장착된 상태에서 별도의 측정장치나 센서들을 필요로 하지 않는 파라미터 측정방법이 요구된다.

본 논문에서 사용하는 파라미터 측정방법은 다음과 같다. 우선 전류제어기의 출력전압과 전류센서를 사용하여 측정한 인버터의 출력전류로부터 인버터의 스위칭손실까지 포함된 전동기의 고정자 저항을 구할 수 있을 뿐 아니라, 이러한 전압과 전류의 관계에서 데드타임 보상시간을 정확히 조정함으로써 제어기의 출력전압을 실제 인버터의 출력전압과 동일하게 할 수 있으므로 별도의 전압센서가 필요하지 않다. 그 다음 여자분전류를 일정하게 유지하고 전동기의 속도가 속도제한치에 도달할 때까지 토크분전류를 일정한 값으로 인가한다. 이 때 q 축 회전자 자속성분에 의해 왜곡되는 인버터의 출력전압을 관찰함으로써 전동기의 회전자 시정수를 측정할 수 있다. 마지막으로, 앞에서와 같은 운전방법으로 전동기를 구동할 때 인버터의 출력전압과 속도와 출력토크와의 관계에서 전동기의 고정자인덕턴스, 과도인덕

턴스 그리고 관성모멘트를 각각 구할 수 있다.

2. 고정자저항(r_s)의 추정과 데드타임 보상시간의 보정

그림1은 인버터의 기준전류를 일정한 간격으로 변화시킬 때 실제전류와 전류제어기의 출력전압의 파형이며, 여기서는 출력전압의 정상상태값을 취하여 사용한다. 이때 제어기의 출력전압에는 식(1)과 같이 유도기의 고정자저항에 의한 전압강하성분과 인버터의 스위칭소자나 환류다이오드에 의한 전압강하성분 등이 포함되어 있을 뿐 아니라 데드타임이나 전류센서의 오프셋 등에 의해 나타나는 비선형적인 성분도 함께 포함되어 있다.[2]

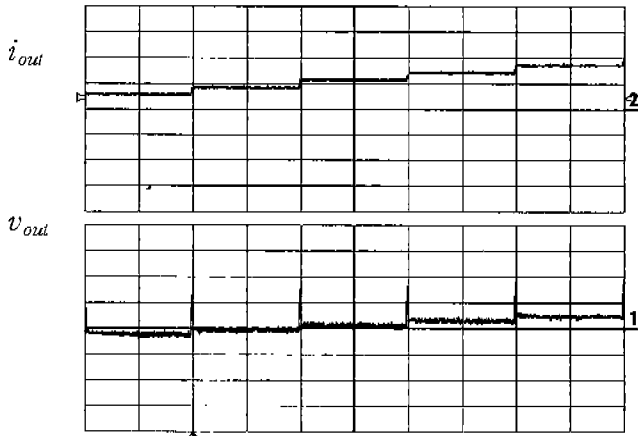


그림1. 기준전류 변경시 실제전류와 제어기 출력전압의 파형

$$v_{out} = (r_{stator} + r_{switch})i_{out} + (v_{dead} + v_{offset}) \quad (1)$$

$$= \text{slope}(v_{out}, i_{out})i_{out} + \text{ycept}(v_{out}, i_{out})$$

v_{out} : 전류제어기의 출력전압

i_{out} : 실제의 전류

v_{dead} : 데드타임에 의한 전압성분

v_{offset} : 센서의 오프셋에 의한 전압성분

식(1)에서 유도기의 고정자저항(r_{stator})과 스위칭손실저항(r_{switch})의 합(r_s)는 전압과 전류사이의 기울기, $\text{slope}(v_{out}, i_{out})$ 이고, 비선형 전압성분은 전압과 전류사이의 y절편, $\text{ycept}(v_{out}, i_{out})$ 에 해당한다. 이때 전류센서의 오프셋에 의한 전압성분은 초기루틴에서 오프셋을 계산한 후 전류추정시마다 이를 보상하여 그 영향을 최소화할 수 있으므로 제어기의 출

력전압에 존재하는 비선형성분은 주로 데드타임 보상오차에 해당하는 값이다. 그러므로 출력전압에서 비선형성분은 식(2)와 같이 데드타임 보상시간을 조절함으로써 제거할 수 있고 이 경우에 제어기의 출력전압과 실제 전압은 동일하다고 볼 수 있다.

$$T_{dead-comp}(n) = T_{dead-comp}(n-1) + \frac{\text{ycept}(v_{out}, i_{out})}{V_{dc}} T_s \quad (2)$$

3. 회전자시정수($\tau_r = L_r/\eta_r$)의 측정

그림2는 회전자시정수 측정시 운전방법으로 정격 여자전류(I_{ds}^e)를 일정하게 유지하고 속도(ω_{rpm})가 제한속도에 도달할 때까지 정격의 토오크분전류(I_{qs}^e)를 인가한다. 이때 토오크분전류가 '0'이 되는 영역에서의 고정자 d축전압을 시간축상으로 표현하면 식(3)과 같이 나타낼 수 있다.

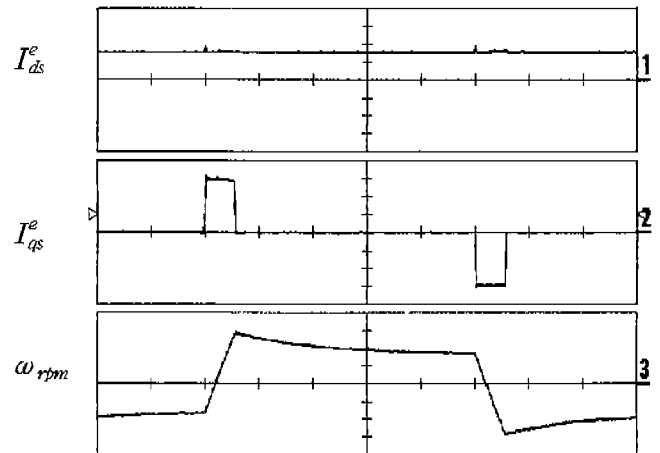


그림2. 회전자시정수(τ_r)측정시 운전방법

$$v_{ds}^e = r_s I_{ds}^e - \left(\frac{L_m}{L_r} \right) e^{-\left(\frac{1}{\tau_r} \right) t} \times \left[\left(\frac{1}{\tau_r} \right) \{ \lambda_{dr}^e(t_0) - L_m I_{ds}^e \} + \omega_r \lambda_{qr}^e(t_0) \right] \quad (3)$$

$$= r_s I_{ds}^e + \Delta v_{ds}^e$$

v_{ds}^e : d축고정자전압

I_{ds}^e : 정격여자전류

$\lambda_{dr}^e(t_0)$: d축회전자속의 초기치

$\lambda_{qr}^e(t_0)$: q축회전자속의 초기치

식(3)에서 동기좌표축으로 표현한 d축전압은 벡터 제어기가 완벽하게 수행되어 d축자속성분만 존재하고

q축자속성분은 없을 때 ($\lambda_{dr}^e(t_0) = L_m I_{ds}^e \lambda_{qr}^e(t_0) = 0$, 시간에 관계없이 고정자저항과 d축전류의 곱에 해당 하는 크기만을 갖는다. 이때 식(3)의 시변항(Δv_{ds}^e)과 회전자시정수의 역수($1/\tau_r$)는 표1[3]과 같은 관계를 가지므로, 식(4)와 같이 벡터제어에서 자속의 위상을 계산하는데 중요한 파라미터인 회전자시정수(τ_r)는 시변항을 관찰하여 측정할 수 있다.

$$\theta_e = \int (\omega_r + \omega_{sl}) dt = \int \left\{ \omega_r + \frac{1}{\tau_r} \left(\frac{I_{qs}^e}{I_{ds}^e} \right) \right\} dt \quad (4)$$

시변항(Δv_{ds}^e)	회전자시정수의 역수($1/\tau_r$)
> 0	추정값 > 실제값
= 0	추정값 = 실제값
< 0	추정값 < 실제값

표1. d축전압의 시변항과 $1/\tau_r$ 와의 관계[3]

그림3은 표1의 관계를 나타내는 전압파형이다.

여기서 d축전압의 시변항(Δv_{ds}^e)은 회전자시정수(τ_r)의 3-5배 정도의 시간이 경과하면 거의 소멸되므로 그 시간동안의 시변항을 더하여 atan()함수의 입력으로 하고, 이 atan()의 출력값이 설정범위에 수렴할 때까지 회전자시정수의 역수($1/\tau_r = \text{Inv}\tau_r$)를 반복하여 수정한다.

$$\text{inv}\tau_r(n) = \left[1 - K_1 \text{atan}^{-1} \left\{ K_2 \sum_{i=t_0}^{t_0+n\tau_r} (\Delta v_{ds}^e) \right\} \right] \times \text{inv}\tau_r(n-1) \quad (5)$$

여기서 K_1 는 파라미터의 변동폭을 결정하는 상수이고, K_2 는 atan()의 입력값이 제어범위에 포함되도록 하는 상수이다.

4. 인덕턴스(L_σ, L_s)와 관성모멘트(J_m)의 측정

인덕턴스(L_σ, L_s)와 관성모멘트(J_m)는 앞에서 회전자시정수(τ_r)를 추정할 때 사용한 방법(그림2)와

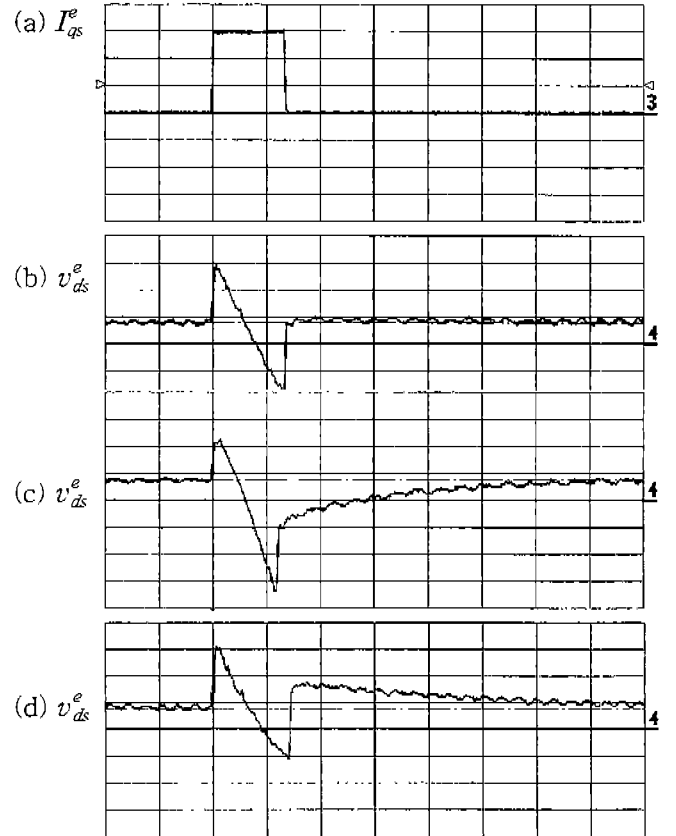


그림3. $1/\tau_r$ 의 변화에 따른 d축전압의 추이

- (a) 토크분전류
- (b) $1/\tau_r$ 의 추정치와 실제치가 같을 때
- (c) $1/\tau_r$ 의 추정치가 실제치보다 10[%]작을 때
- (d) $1/\tau_r$ 의 추정치가 실제치보다 10[%]클 때

동일하게 운전하면서 구할 수 있는데, q축도오크 전류가 인가되는 영역에서의 d-q축 고정자전압은 벡터제어가 제대로 될 때 각각 식(6), (7)과 같이 나타낼 수 있다.

$$v_{ds}^e = (r_s i_{ds}^e - \omega_{sl} L_{\sigma} i_{qs}^e) - \omega_r L_{\sigma} i_{qs}^e \quad (6)$$

$$v_{qs}^e = (r_s i_{qs}^e + \omega_{sl} L_{\sigma} i_{ds}^e) + \omega_r L_{\sigma} i_{ds}^e \quad (7)$$

위의 식에서 d-q축 고정자전압과 모터의 속도와 관계에서 기울기를 구하면, 식(8), (9)와 같이 과도인덕턴스(L_σ)와 고정자인덕턴스(L_s)를 각각 계산할 수 있다.[3]

$$L_\sigma = \text{slope}(v_{ds}^e, \omega_r) / i_{qs}^e \quad (8)$$

$$L_s = \text{slope}(v_{qs}^e, \omega_r) / i_{ds}^e \quad (9)$$

관성모멘트(J_m)은 무부하상태($T_{load} \approx 0$)에서 식(10)과 같은 기계식으로부터 계산할 수 있다.

$$T_e = J_m \frac{\Delta\omega_r}{\Delta t} \quad (10)$$

5. 실험결과

그림4는 본 실험에서의 유도전동기 구동시스템의 구성도이며, 표2에 유도전동기의 정격 및 각종 제어 상수들이 나타나 있다. 여기서 사용한 게이트 드라이버(세미크론사, SKHI22)는 약 2.7[usec]의 데드타임 발생하도록 설정되어 있다.

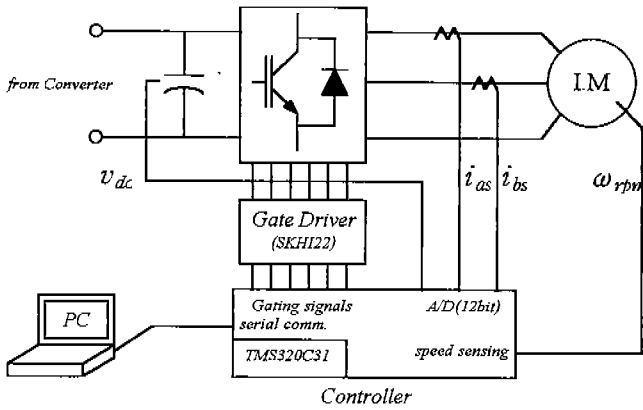


그림4. 유도전동기 구동시스템의 구성도

정격용량	22[kW]
정격전류	39.7[A], rms
정격전압	440[V]
정격속도	1770[rev/min]
극수	4
d축여자전류	11.2[A], rms
속도제한치	500[rev/min]

표2. 유도전동기의 정격 및 각종 제어상수

표3은 본 논문에서의 파라미터 추정방법을 사용하여 추정한 파라미터들로 10회 반복한 평균값과 평균값에 대한 최대오차의 백분율이다. 이때 추정값들이 상당히 안정적임을 알 수 있다.

그림5, 6과 7은 위에서 추정한 파라미터들을 사용해서 직접벡터방식으로 속도제어를 한 속도와 전류와 추정자속의 파형이다. 그림5는 기준속도의 가감속시간을 0[sec]로 하고 +400[rpm]에서 -400[rpm]으로 기준속도를 바꿀 때의 파형이고, 그림6은 정토크영역에서 1200[rpm]으로 운전할 때의 파형이며,

그림7은 2500[rpm]으로 운전한 약계자영역에서의 파형이다.

	평균값	최대오차
R_s	0.1458[Ohm]	2.34[%]
$1/Tr$	4.451[1/sec]	1.28[%]
L_{σ}	3.48[mH]	2.87[%]
L_s	40.06[mH]	0.4[%]
J_m	0.165[kg*m*m]	1.12[%]
Dead-time comp.	2.66[usec]	4.25[%]

표3. 추정한 유도전동기 파라미터의 평균값과 최대오차 ($inv\tau_r(t_0) = 3.0$ $T_{dead-comp}(t_0) \neq 0$)

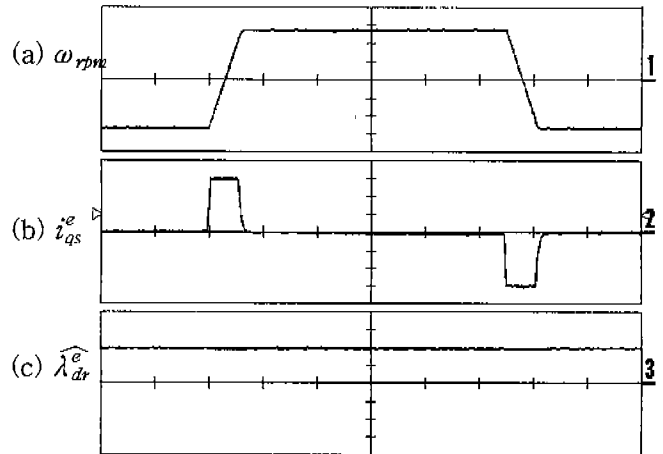


그림5. 가감속시간을 영으로 하였을 때
(a) 실제속도(-600[rpm] - +600[rpm])
(b) q축전류(-60[A] - +60[A])
(c) d축회전자자속의 추정치(-2[Wb] - +2[Wb])

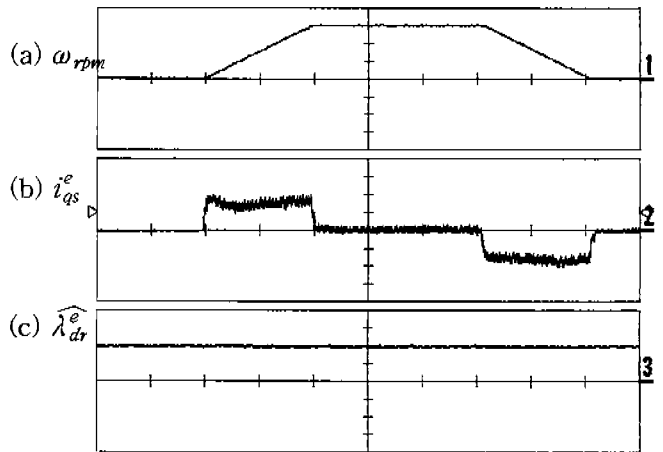


그림6. 정토크영역에서의 운전

- (a) 실제속도(-1600[rpm] - +1600[rpm])
- (b) q축전류(-10[A] - +10[A])
- (c) d축회전자자속의 추정치(-2[Wb] - +2[Wb])

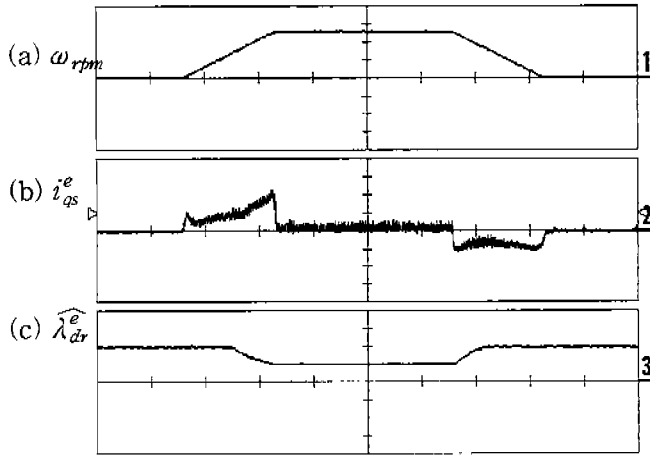


그림7. 약계자영역에서의 운전

- (a) 실제속도(-4000[rpm] - +4000[rpm])
- (b) q축전류(-10[A] - +10[A])
- (c) d축회전자자속의 추정치(-2[Wb] - +2[Wb])

6. 결론

이 방법은 이전의 방법[3]과는 달리 전압센서와 같은 하드웨어의 추가설치를 전혀 필요치 않으므로 기존의 인버터에 쉽게 적용할 수 있다. 또한 앞의 실험에서 알 수 있듯이, 본 논문에서 사용한 방법을 이용하여 유도전동기의 파라미터들을 추정한 결과, 그 값들이 매우 안정적이고 정토크영역이나 정출력영역에서 모두 우수한 운전특성을 나타내고 있다.

참고문헌

- [1] 석 줄기, “가상 회전자 자속기준제어를 이용한 심구형 유도전동기의 고성능 운전”, 서울대학교 공과대학 전기공학과 박사학위 논문, 1998.
- [2] 1000KVA급 IGBT형 벡터제어 인버터 개발, 서울대학교 기초전력공학 공동연구소 전력전자연구실, 최종보고서, 1996년 12월
- [3] Masahiko Akiyama, Kohji Kobayashi, Ichiro Miki, and Mohamed A. El-Sharkawi, "Auto-Tuning Method for Vector Controlled Induction Motor Drives", IPEC, pp.789-794, 1995.