

연속공정라인에서 벡터제어용 유도전동기의 오프라인 파라미터 추정

權炳基, 崔昌鎬, 玄東石

Off-line Parameter Estimation for Vector Control of Induction Motors in Continuous Process Line

Byung-Ki Kwon, Chang-Ho Choi, and Dong-Seok Hyun

요약

본 논문에서는 벡터제어용 유도전동기에 대한 파라미터 추정기법을 제시하였다. 이 제어기법은 실제 운전시의 상태와 동일한 조건하에 추정하므로 고성능의 토크제어가 요구되는 연속공정라인과 같은 산업현장에 용이하게 적용할 수 있다. 또한 출력전압의 추정에 의해 전압센서와 측정장치 같은 부가적인 하드웨어가 필요치 않으며, 추정 오차에 대한 고정자 전압의 변동을 관찰함으로써 정확하고 매우 안정적인 추정값을 얻는다. 제안된 기법의 타당성 및 유용성은 모의시험장치와 실제 현장라인의 적용을 통하여 입증하였다.

ABSTRACT

In this paper, a parameter estimation method for a vector control of induction motors is presented. It can be easily implemented to the inverters in the industrial fields such as continuous process line, which requires the high performance of torque control, because of being estimated under the condition of the actual operating states. Also, this method needs no additional hardware such as voltage sensors and measuring equipments by the estimation of output voltage, and has good accuracy and repeatability by observing the variation of the stator voltage due to estimation errors. Experimental results verify the validity and usefulness of the proposed estimation method in the industrial fields.

Key Words : continuous process line, vector control, parameter estimation

1. 서론

오늘날 산업현장에서 벡터제어 알고리즘을 적용한 유도전동기는 반도체 소자의 발달과 고성능 마이크로 프로세서의 출현으로 인해 직류전동기 이상의 고성능 속도 및 토크제어가 가능하게 되었으며 제철, 제지, 인쇄, 섬유 등의 생산 및 처리가 연속으로 이루어지는 공정으로서의 적용이 점차 증가하는 추세이다. 이러한 고성능의 속도 및 토크제어를 수행하기 위한 전제조건은 완벽한 벡터제어가 구현될 때 가능하며, 이를 위해서는 유도전동기 상수의 정확한 추정이 요구된다. 이

러한 전동기상수들은 제조업체에서 제공하는 데이터에 의해 얻을 수 있고 무부하시험이나 구속시험과 같은 고전적인 방법으로도 구할 수 있지만, 전동기의 회전자를 구속하거나 별도의 가변전압원 등의 추가적인 장치가 필요하며, 이러한 방법으로 구한 값들은 실제 운전시의 값들과 많은 차가 있으므로 고성능 벡터제어가 요구되는 산업 현장의 실제 적용에는 많은 어려움이 있다.^{[1][2][5]} 또한 산업현장의 여러 가지 조건(전동기와 인버터간의 설치거리, 입출력 필터, 대지와 선로사이의 임피던스 등)이 충분히 고려된 상태에서 벡터제어의 성능이 제대로 발휘되도록 전동기상수가 선정되어야

한다.

실제로 연속공정라인과 같이 고성능의 토크제어가 요구되는 산업현장에선 초기에 전동기상수의 설정기간이 필요하며, 이를 위해선 구현이 간단하고 추정값들이 안정적이며 별도의 측정장치나 센서들을 필요치 않는 추정방법이 요구된다. 본 논문에서는 인버터의 스위칭 소자와 환류 다이오드에 의한 전압강하성분이나 케이블에 의한 전압강하성분과 함께 데드타임이나 전류센서의 오프셋 등에 의한 비선형성분까지 충분히 고려한 출력전압 추정기를 설계하였다. 간접벡터제어로 운전할 때 회전자시정수의 오차로 인해 발생하는 고정자 d축 전압성분의 시변향을 관찰함으로써 회전자시정수를 추정할 수 있으며, 고정자 인덕턴스, 과도 인덕턴스 그리고 관성 모멘트는 출력전압과 속도와 토크 사이의 관계에 의해 추정할 수 있다.^[1]

2. 고정자 저항(R_s)의 추정과 비선형성분의 보상^[3]

전류제어기의 출력전압은 식 (1)에서와 같이 각각 고정자 저항과 스위칭 손실저항, 그리고 케이블의 저항성분 등과 같이 선형성분에 해당하는 항과 데드타임이나 전류센서의 오프셋 등과 같이 비선형성분에 해당하는 항으로 구성되어 있다. 그림 1은 전류제어기의 기준전류를 일정한 간격으로 증가시킬 때의 실제전류(i_{out})와 제어기 출력전압(v_{out})의 파형으로 정상상태의 값(sampling point 지점)만을 취하여 전압과 전류사이의 기울기(slope)와 오프셋(ycept)을 측정한다. 이때 기울기는 출력전압의 선형성분이고 오프셋은 비선형성분에 해당하며, 이 값들의 측정을 위해 최소자승법(Least-Square Method)^[7]을 사용한다.

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

v_{out} : 전류제어기의 출력전압

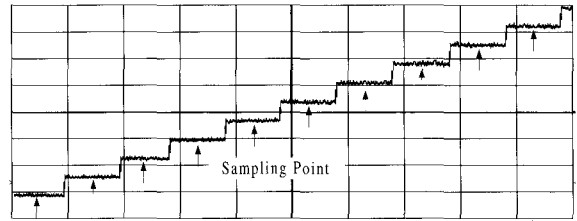
i_{out} : 실제의 전류

v_{dead} : 데드타임에 의한 전압성분

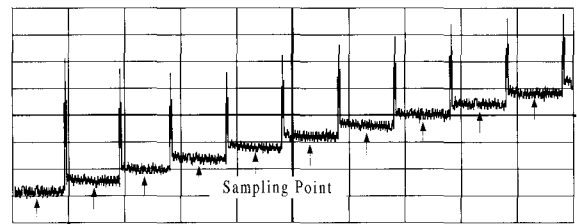
v_{offset} : 센서의 오프셋 의한 전압성분

제어기의 출력전압은 식 (1)의 비선형성분이 제거되었을 때 실제전압과 동일하게 볼 수 있으며 이는 그림 2와 같이 데드타임의 보상시간(T_{comp})을 조절함으로써 가능하다.(비선형성분 중 전류센서의 오프셋에 의한 성

분은 초기루틴에서 계산한 후 전류추정시마다 이를 보상함으로써 그 영향을 최소화할 수 있다.) 여기서 $T_{dead-time}$ 은 게이팅 발생회로에서 생성되는 데드타임 시간이며 PI-제어기의 이득은 실험적으로 구한다.



(a) 출력전류(i_{out})



(b) 제어기의 출력전압(v_{out})

그림 1 고정자저항 추정시 운전

Fig. 1 Operation for estimation of stator resistance

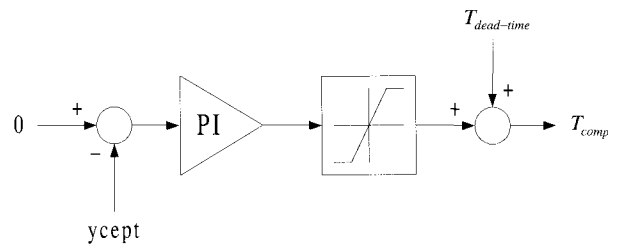


그림 2 비선형 성분의 보상기

Fig. 2 The compensator of non-linear component

3. 회전자 시정수($\tau_r = L_r/r_r$)의 추정

그림 3은 회전자 시정수 추정시 운전방법으로 정격 여자전류(I_{ds}^e)를 일정하게 유지한 상태에서 전동기의 속도(ω_{rpm})가 제한속도(ω_{limit})에 도달할 때까지 정격 토크전류(I_{qs}^e)를 인가하고 속도가 제한속도에 도달하면 '0'으로 한다. 이때 토크전류가 '0'이 되는 영역에서 d축 고정자 전압을 시간축상으로 표현하면 식 (2)와 같이 나타낼 수 있다.

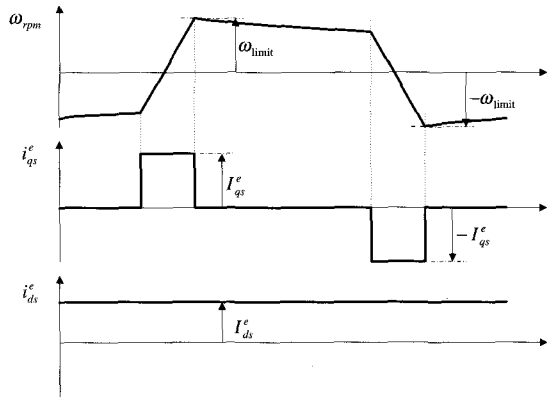


그림 3 회전자시정수(τ_r)의 추정시 운전방법
Fig. 3 Operation Method for estimation of rotor time constant

$$v_{ds}^e = r_s I_{ds}^e - \frac{L_m}{L_r} e^{-\frac{1}{\tau_r} t} \left[\frac{1}{\tau_r} \{ \lambda_{dr}^e(t_0) - L_m I_{ds}^e \} + \omega_r \lambda_{qr}^e(t_0) \right] = r_s I_{ds}^e + \Delta v_{ds}^e \quad (2)$$

v_{ds}^e : d축 고정자전압

I_{ds}^e : 정격여자전류

$\lambda_{dr}^e(t_0)$: d축 회전자자속의 초기치

$\lambda_{qr}^e(t_0)$: q축 회전자자속의 초기치

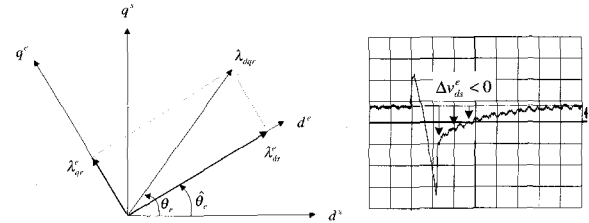
Δv_{ds}^e : d축 고정자전압의 시변항

$$\theta_e = \int (\omega_r + \omega_{sl}) dt = \int \left\{ \omega_r + \frac{1}{\tau_r} \left(\frac{I_{qs}^e}{I_{ds}^e} \right) \right\} dt \quad (3)$$

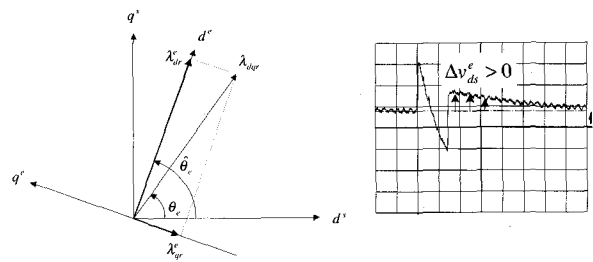
$$\widehat{\theta}_e = \int (\omega_r + \widehat{\omega}_{sl}) dt = \int \left\{ \omega_r + \frac{1}{\widehat{\tau}_r} \left(\frac{I_{qs}^e}{I_{ds}^e} \right) \right\} dt \quad (4)$$

식 (3)은 실제의 회전자 시정수로 인한 자속각이며 식 (4)는 추정된 회전자 시정수로 계산한 자속각이다. 회전자 시정수의 추정이 정확하여 벡터제어가 제대로 수행되는 경우, 회전자 자속은 d축 성분만 존재하고 q축 성분은 없으므로($\lambda_{dr}^e(t_0) = L_m I_{ds}^e$, $\lambda_{qr}^e(t_0) = 0$), 식 (2)의 전압식은 시간에 관계없이 항상 고정자 저항과 d축 고정자 전류의 곱($r_s I_{ds}^e$)에 해당하는 크기만을 갖는다. 하지만 추정된 회전자 시정수가 실제의 값과 일치하지 않을 때에는 q축 자속성분이 존재하여 식 (2)로부터 전압식에 시변항 성분이 발생하게 된다. 이 시변항의 극성은

주로 q축 회전자 자속에 따라 좌우되며 그림 4는 이러한 관계를 나타낸다. 그림 4-(a)는 추정된 자속각이 실제각보다 작은 경우, (+)의 크기를 갖는 q축 회전자 자속이 존재하며 이로 인해 (-)의 크기를 갖는 시변항이 생긴다. 그림 4-(b)는 반대로 추정된 자속각이 실제각보다 큰 경우 (-)의 q축 회전자 자속과 (+)의 시변항이 존재함을 알 수 있다. 이러한 관계로부터 회전자 시정수와 시변항의 관계는 표 1에서와 같이 나타낼 수 있다



(a) $\lambda_{qr}^e(t_0) > 0$ 인 경우



(b) $\lambda_{qr}^e(t_0) < 0$ 인 경우

그림 4 q축 회전자자속(λ_{qr}^e)에 따른 d축 전압의 변동

Fig. 4 The vector diagrams of rotor flux and the response of v_{ds}^e

표 1 추정된 회전자 시정수와 q축 회전자 자속과 시변항의 관계

Table 1 The relationship of estimated rotor time constant, q-axis rotor flux, and time-variant term of d-axis stator voltage

회전자 시정수	q축 회전자자속	시변항(Δv_{ds}^e)
$\widehat{\tau}_r > \tau_r$	$\lambda_{qr}^e(t_0) > 0$	$\Delta v_{ds}^e < 0$
$\widehat{\tau}_r \approx \tau_r$	$\lambda_{qr}^e(t_0) \approx 0$	$\Delta v_{ds}^e \approx 0$
$\widehat{\tau}_r < \tau_r$	$\lambda_{qr}^e(t_0) < 0$	$\Delta v_{ds}^e > 0$

여기서 시변항(Δv_{ds}^e)은 회전자 시정수(τ_r)의 3~5배 정도의 시간이 경과하면 거의 소멸되므로 그 시간동안

의 시변항을 더하여 atan()함수의 입력으로 하고, 이 atan()의 출력값이 설정범위에 수렴할 때까지 회전자 시정수의 역수 (Inv $\tau_r = 1/\tau_r$)를 식 (5)에 의해 반복하여 수정한다.

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

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

4. 인덕턴스와 관성 모멘트의 추정

과도 인덕턴스(L_σ), 고정자 인덕턴스(L_s), 및 관성 모멘트(J_m)는 회전자 시정수(τ_r)를 추정할 때 사용하는 방법(그림 3)과 동일하게 운전하면서 추정할 수 있으며, 이들의 추정은 q축 토크 전류가 인가되는 영역에서 고정자 전압과 토크와 속도를 관찰함으로써 가능하다. 앞에서 구한 회전자 시정수로 벡터제어가 정확히 이루어질 때 고정자 전압식은 식 (6), (7)과 같이 나타낼 수 있으며 과도 인덕턴스와 고정자 인덕턴스는 식 (8)과 (9)와 같이 전압과 전동기의 속도와의 관계(기울기)에서 구할 수 있다.^[1]

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

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

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

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

기계계의 식은 무부하상태에서 식 (10)과 같이 나타낼 수 있으며, 이로부터 관성 모멘트는 식 (11)에서와 같은 식으로 계산할 수 있다.

$$T_e \approx J_m \frac{d\omega_r}{dt} \quad (10)$$

$$J_m = T_e^* \frac{\Delta t}{\Delta \omega_r} \quad (11)$$

그림 5는 전체 상수추정 알고리즘의 순서도이다.

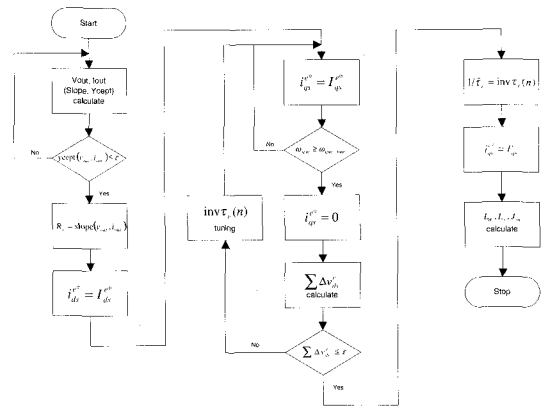
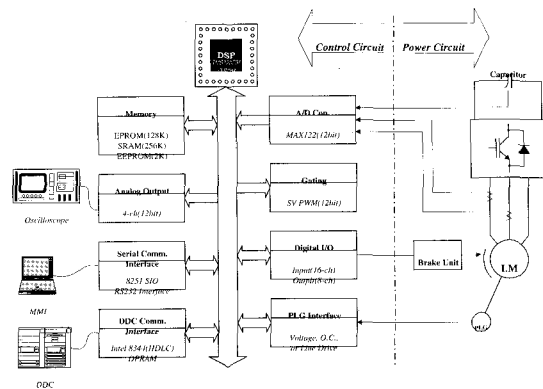


그림 5 유도전동기 파라미터 추정의 전체 순서도
Fig. 5 Overall flow-chart for parameter estimation of induction motor

5. 실험결과

그림 6은 본 실험에서 사용한 실험장치의 시스템 구성도이며, 표 2에 유도전동기의 정격 및 각종 제어상수들이 나타나 있다.



MMI : Man-Machine Interface

DDC : Direct Digital Control

그림 6 실험장치의 시스템 구성도
Fig. 6 System configuration of experimental equipment

표 3과 그림 7은 제안한 추정알고리즘을 사용하여 추정한 상수들로 10회 반복했을 때의 평균값과 그 평균값에 대한 오차의 백분율이다.

그림 8에서 그림 11은 위에서 추정한 상수들을 사용해서 직접 벡터방식으로 속도제어를 한 파형이다. 그림 8은 단위 응답 속도의 정역 운전시 파형이고(-400[rpm]

표 2 유도전동기의 정격 및 각종 제어상수
Table 2 Ratings of the induction machine and control constants

정격용량	22 [kW]
정격전류	39.7 [A]
정격전압	440 [V]
정격속도	1770 [rpm]
극수	4
전류제어기의 cut-off주파수	1000 [rad/s]
속도제어기의 cut-off주파수	5 [rad/s]
스위칭 주파수	4 [kHz]
데드타임의 설정치	2.6 [μsec]

표 3 추정한 파라미터의 평균값
Table 3 The average value of estimated parameters

상수	평균값
고정자 저항(r_s)	0.1458 [Ω]
회전자시정수의 역수($\frac{1}{T_r}$)	4.451 [1/sec]
과도인덕턴스(L_o)	3.48 [mH]
고정자인덕턴스(L_s)	40.06 [mH]
관성모멘트(J_m)	0.165 [$K_g m^2$]
데드타임 보상시간(T_{comp})	2.66 [μsec]

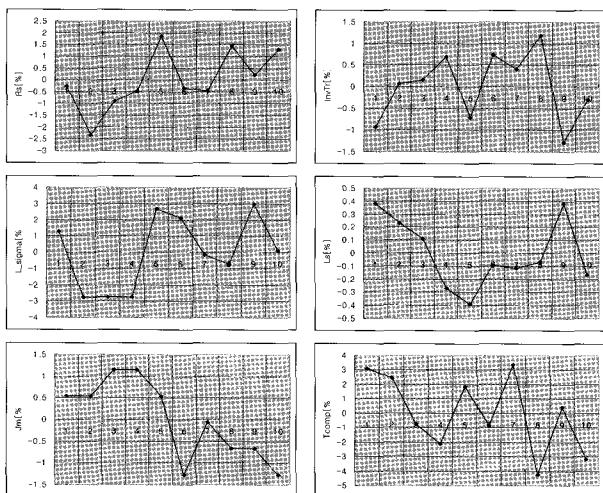


그림 7 추정한 상수의 오차범위
Fig. 7 The error of estimated constants

에서 +400[rpm]), 그림 9와 그림 10은 각각 토크영역(1200[rpm])과 약계자 영역(2500[rpm])에서의 정운전 파형이다. 그림 11은 속도제어기의 출력이 포화되지 않은 범위에서 가감속 시간을 '0'초로 하고 속도제어기의 응답시간이 0.2초(기준속도의 63[%]에 도달시간)가 되도록 속도제어기를 설계하였을 때의 속도응답파형이다. 연속공정라인에 적용되는 모든 전동기는 가감속 운전시 모두 동일한 속도응답을 갖도록 설정되어야 한다.

그림 12는 1997년에 (주)포스콘이 일괄 공급한 광양 제철소 4냉연 공장의 recoil 라인이다. 이 라인에 적용

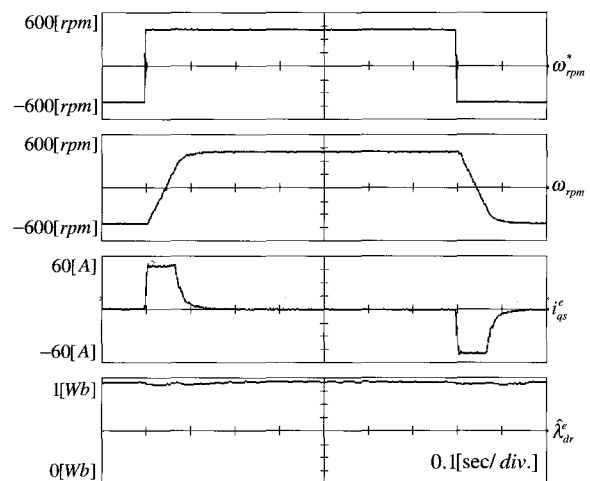


그림 8 단위응답속도로 운전시 실험결과
Fig. 8 Experimental results at step response

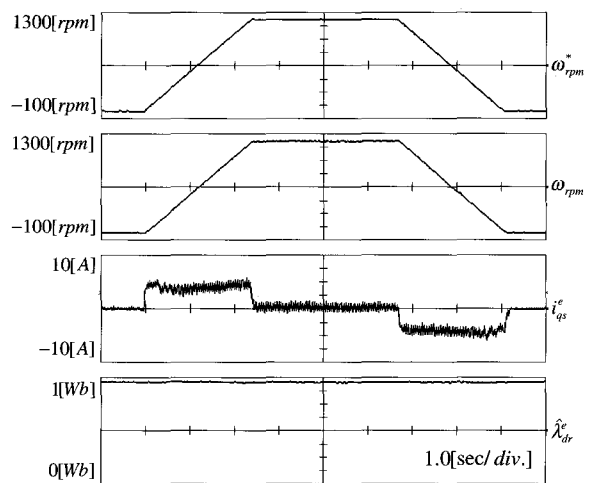


그림 9 정토크 영역에서 운전시 실험결과
Fig. 9 Experimental results at constant torque region

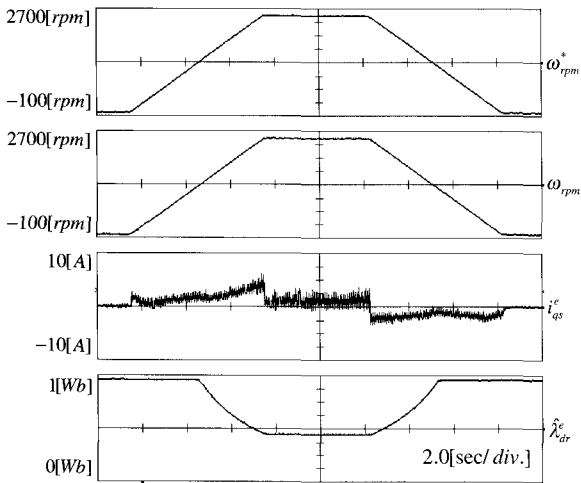
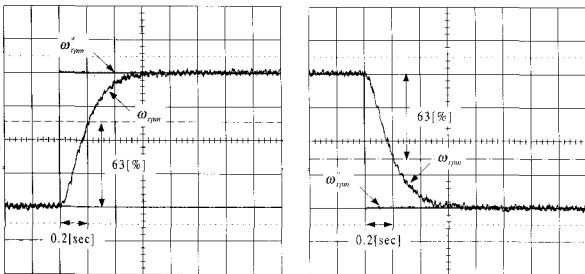


그림 10 약계자영역에서 운전시 실험결과
 Fig. 10 Experimental results at field weakening region



(a) 가속시 (b) 감속시

그림 11 속도응답 파형
 Fig. 11 The waveform of speed response

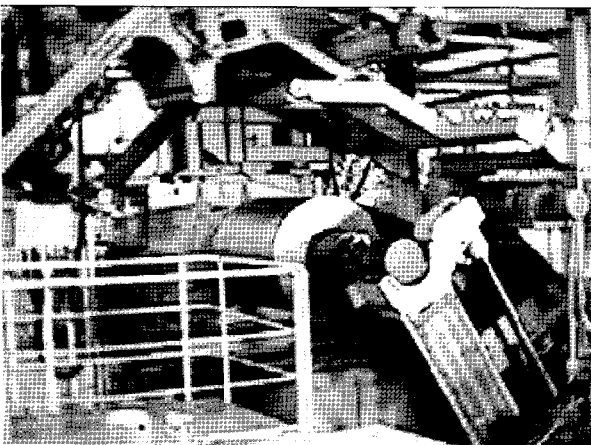


그림 12 광양제철소 4냉연 recoil라인
 Fig. 12 Recoiled-line in cold mill at Kwang-yang Steelworks

된 3.7[kW]에서 75[kW]에 이르는 다양한 용량의 수많은 벡터제어 유도전동기는 동일한 속도응답과 정확한 토크제어를 필요로 하며, 이러한 성능의 구현은 본 논문에서 제안한 유도전동기의 상수추정방법을 적용하여 구현하였다.

6. 결론

본 논문에서는 벡터제어용 유도전동기의 오프라인 상수추정기법에 대해 제안하였다. 이 방법은 기존의 방식^[1]과는 달리 출력전압의 비선형성분을 보상함으로써 전압센서와 같은 하드웨어의 추가없이 인버터가 장착된 상태에서 상수의 추정이 가능하며, 그 추정치가 매우 안정적일 뿐 아니라 실제의 운전상태와 동일한 조건하에서 이 값들을 추정함으로써 연속공정라인과 같은 산업현장의 적용에 매우 적합함을 알 수 있었다. 실제로 이 상수들을 사용하여 벡터제어를 하였을 때, 속도제어의 우수한 응답특성과 진 속도영역에서의 양호한 성능으로부터 이 값이 실제값을 잘 추정한다는 것을 확인할 수 있다.

참고 문헌

- [1] Masahiko Akiyama, Kohji Kobayashi, and Mohamed A. El-Sharkawi, "Auto-Tuning Method for Vector Controlled Induction Motor Drives," *IPEC'95*, pp. 789-794, 1995.
- [2] Peter Vas, "Parameter estimation, Condition monitoring, and Design of electrical machine," *Clarendon Press Oxford*, pp. 279-306, 1993
- [3] J.W.Choi and S.k. Sul, "Inverter Output Voltage Synthesis Using Novel Dead Time compensation," *IEEE Trans. on Power Electronics*, Vol.11, No.2, pp.221-227, 1996, March
- [4] A.M.Khambadkone and J.Holtz, "Vector-Controlled Induction Motor Drive with a Self-Commissioning Scheme," *IEEE Trans. Ind. Appl.*, Vol. 38, No. 5, pp.322-328, 1991, Oct.
- [5] 석줄기, "가상 회전자 자속기준제어를 이용한 심구형 유도전동기의 고성능 운전," 서울대학교 공과대학 전기공학 학과 박사학위 논문, 1998.
- [6] Byung-Ki Kwon, Won-chang Shin, Chang-ho Choi, Dong-Seok Hyun, "Off-line Parameter Estimation of Induction Motor for Vector Control In Continuous Process line," *ICPE'98*, Seoul, pp. 386-391, 1998
- [7] 정인환 외 4인 공역, "최신공업수학 7권," 범한서적, pp. 1036 - 1039, 1993

저 자 소 개



권병기(權炳基)

1970년 12월 5일생. 1993년 광운대학교 전기공학과 졸업(학사). 1995년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1995년~현재 포스콘 기술연구소 연구원.



최창호(崔昌鎬)

1956년 10월 18일생. 1979년 아주대학교 전기공학과 졸업(학사). 1984년 서울대 대학원 전기공학과 졸업(석사). 현재 포스콘 기술연구소 수석연구원.



현동석(玄東石)

1950년 4월 8일생. 1973년 한양대학교 전기공학과 졸업(학사). 1978년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1986년 서울대 대학원 전기공학과 졸업(공박). 1984년~1985년 미국 토레도대학 교환교수. 1988년~1989년 원혜공과대학 교환교수. 현재 한양대 공대 전기공학과 교수. 당 학회 회장.