2001년도 대한전기학회 전기기기 및 에너지변환시스템학회 춘계학술대회 논문집(2001.4.19~21)

직접 토크제어에 의한 속도검출기 없는 유도전동기 제어시스템

김남훈*, 김민호*, 김민회**, 김동희*, 최경호*
*영남대학교, **영남이공대학

A Speed Sensorless Induction Motor Control System with Direct Torque Control system

Nam-hun Kim*, Min-Ho Kim*, Min-Huei Kim**, Dong-Hee Kim*, Kyung-Ho Choi*
*Yeungnam University, **Yeungnam college of Science & Technology

Abstract - This paper presents implementation of digitally speed sensorless control system for induction motor with a direct torque control(DTC) using 32bit DSP TMS320C31. The system are closed loop stator flux and torque observer for wide speed range that inputs are currents and voltages sensing of motor terminal, MRAS with rotor flux linkages for the speed turning signal, two hysteresis controllers, optimal switching look-up table and IGBT voltage source inverter. There are suggested a control algorithm and system, and given simulation and implementation results on the 2.2kw general purposed induction motor.

Key Words : DTC, Speed Sensorless, MRAS, Stator Flux and Torque Observer

I. 서론

최근 급속도로 발전되고 있는 산업분야에서 정밀하고 빠른 응답 특성을 갖는 전동기 제어시스템이 필수적으로 요구됨에 따라 여러 가지 형태의 제어시스템 개발이 연구되어 오고있다. 유도전동기를 적용한 정밀제어 시스템은 벡터제어 이론이 적용되어 안정적으로 제어하기 위해서는 속도 검출기나 위치 검출기에 의한 전동기의 속도 정보가 필수적이다. 그러나 속도 검출기나 위치 검출기는 가격과 유지비를 증가시키며 시스템을 복잡하게 하며 기계적 강인성과 신뢰성을 떨어뜨리기 때문에 검출기가 없는 제어기법에 대한 연구가 매우 활발히 진행되고 있는 실정이다[1]-[19].

본 논문에서는 최근 제어구조가 디지털 형태로 간단하고 전동기 파라메타의 영향이 적은 직접토크제어(DTC) 이론을 적용한 속도 검출기 없는 제어시스템을 구현하였다[10],[11]. 자속 추정은 폐루프 자속관측기를 사용하였으며, 고정자 자속을 사용한 MRAS(Model Reference Adaptive System)를 사용하여 속도를 추정하였다[2]-[6]. 일반적으로 전동기 제어 시스템은 광범위한 속도범위에서 안정된 운전특성을 얻기가 어렵다. 이를 해결하기 위하여 모든 속도 영역에서 안정되고 우수한 특성이 얻어지는 Jansen이 제안한 폐루프 자속 관측기(Closed-loop flux observer)를 적용하여 고정자의 자속과 토크를 직접 제어하여 빠른 응답특성이 얻어지는 유도전동기의 속도제어 시스템을 제시하였다[9]-[11]. 제안된 시스템의 적용가능성을 확인하기 위해서 시뮬레이션을 통해 검증하였으며, 개발된 제어 프로그램과 시스템의 운전특성을 조사하기 위하여 IGBT 전압원 인버터에 2.2Kw 범용 유도전동기를 적용하여 속도센서 없는 DTC의 응답특성을 고찰한 결과 시뮬레이션에서와 같이 실험에서도 동적 특성이 얻어짐을 확인 하였다.

II. 직접 토크제어와 자속 관측기

2.1 직접 토크제어의 특성

유도전동기의 직접 토크 및 자속 제어는 인버터에 가해지는 최적 스위칭 모드 선택에 의하여 전동기에 공급되는 단자전압 제어에 의하여 이루어지므로 직접적으로 고정자의 자속과 발생되는 토크를 서로 독립적으로 제어 할 수 있다. DTC의 장점은 제어구조가 디지털 형태로 아주 단순하고, 토크의 동적 특성이 전동기 회전자의 파라미터 변동에 영향이 적으며, 많은 제어기의 채용과 복잡한 알고리즘 계산에 요구되는 연산시간을 감소시킬 수 있는 특징을 가지고 있어 빠른 동적 응답특성이 요구되는 시스템에 큰 장점을 가지는 제어방식이다[4],[5].

유도전동기의 고정자와 회전자의 쇄교자속은 식(1)과 같은 상태방정식으로 표시되며, 토크는 식(2)로 된다. 여기서 $\overline{V_s}$는 고정자의 공간전압벡터를, $\overline{I_S}$는 공간전류벡터를 나타낸 것이다.

$$\overline{\Phi_s} = \int (\overline{V_s} - \overline{I_S}\, R_S)\, dt = \Phi_{ds} + j\,\Phi_{qs} \qquad (1)$$

$$T_e = \left(\frac{3}{2}\right)\left(\frac{P}{2}\right)(\overline{\Phi_s} \times \overline{I_s}) \qquad (2)$$

인버터에 의한 구동시스템에서 임의의 위치에서 선택 될 수 있는 6개의 섹터위치에 따른 자속($\triangle\overline{\Phi_n}$)과 인버터가 출력할 수 있는 8개의 전압벡터($\overline{V_n}$)에 따라 히스테리시스 밴드 안에서 스위칭 벡터의 선택에 따라 회전하고 있는 자속의 궤적을 결정 할 수 있으며, 이와 같이 고정자의 쇄교자속이 결정되면 식(2)에 의하여 발생 토크를 계산 할 수 있다[4],[5].

2.2 최적 스위칭 벡터

최적의 스위칭 전압벡터는 출력 토크와 고정자 자속의 상태 모두를 동시에 만족하게 하는 특수한 고정자의 전압벡터를 선택하는 것이다. 이것은 전압원 인버터에서 만들 수 있는 6개의 유효 전압벡터와 2개의 영 전압벡터로 구성된다

만약 토크의 증가가 요구될 때에는 최적의 스위칭 전압벡터는 고정자 자속을 법선 방향으로 끌어올리는 방향으로 작용하며 회전자의 자속은 반대방향으로 발생되는 한 개의 고정자 전압벡터(Vn)을 선택한다. 이때 만들어진 사이각은 발생 토크를 효과적으로 증가시킨다. 반대로 토크를 감소시킬 때 최적의 스위칭은 토크를 감소시키는 전압벡터를 선택하여 토크를 감소시킨다. 이와 같은 원리를 적용하여 최적 스위칭 전압벡터의 룩업 테이블 작성 한다[4],[5].

2.3 자속 관측기

직접 토크제어(DTC)의 운전특성은 추정된 고정자 자속의 정확도에 따라 대단히 큰 영향을 받으며, 자속 관측기에는 여러 가지 형태의 자속 추정기가 있다. 일반적으로 전압 모델을 적용한 고정자 자속 관측기는 고속영역에서 우수한 특성이 얻어 지며, 저속영역에서는 전류 모델의 관측기가 우수한 특성이 얻어진다. 본 연구에서는 저속 영역에서는 전류모델을 이용하고 고속영역에서는 전압모델을 이용하는 전압전류 폐루프 자속관측기를 사용하여 넓은 속도 범위에서 정확한 자속을 추정할 수 있도록 하였다[8]-[11]. 그림 1은 전압 모델과 전류모델이 결합된 폐루프 자속 관측기를 보여주고 있으며 각 부분의 수식은(3)-(8)에서 나타내었다.

$$\begin{bmatrix} I^r_{qs} \\ I^r_{ds} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathrm{Cos}\theta_r & -\mathrm{Sin}\theta_r \\ \mathrm{Sin}\theta_r & \mathrm{Cos}\theta_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I^s_{qs} \\ I^s_{ds} \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$P\begin{bmatrix} \Phi^r_{dr} \\ \Phi^r_{dr} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{1}{T_r}\Phi^r_{qr} + \frac{L_m}{T_r} I^r_{qs} \\ -\frac{1}{T_r}\Phi^r_{dr} + \frac{L_m}{T_r} I^r_{ds} \end{bmatrix} \quad (4)$$

$$\begin{bmatrix} \Phi^s_{qr} \\ \Phi^s_{dr} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathrm{Cos}\theta_r & -\mathrm{Sin}\theta_r \\ \mathrm{Sin}\theta_r & \mathrm{Cos}\theta_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Phi^r_{qr} \\ \Phi^r_{qr} \end{bmatrix} \quad (5)$$

$$\begin{bmatrix} \Phi^s_{qs} \\ \Phi^s_{ds} \end{bmatrix} = \frac{L_m}{L_r}\begin{bmatrix} \Phi^s_{qr} \\ \Phi^s_{dr} \end{bmatrix} + \sigma L_s \begin{bmatrix} I^s_{qs} \\ I^s_{ds} \end{bmatrix} \quad (6)$$

$$K_1 = \frac{L_m}{L_r}(\sigma_1 + \sigma_2),\ K_2 = \frac{L_m}{L_r}\sigma_1\sigma_2 \quad (7)$$

$$\Phi^s_{qds} = \int [(V^s_{qds} - R_s I_{qds}) + \varepsilon_\phi (K_1 + \frac{K_2}{P})]dt \quad (8)$$

여기서, I^r_{qds}은 회전자에서 본 고정자의 전류, I^s_{qds}은 고정자에서 본 고정자의 전류, Φ^s_{qds}는 고정자에서 본 고정자의 자속, Φ^r_{qdr}는 회전자에서 본 회전자의 자속, Φ^s_{qdr}는 고정자에서 본 회전자의 자속, T_r은 회전자 시정수, ε_ϕ는 페루프 자속관측기의 고정자 자속과 전류모델 관측기의 고정자 자속의 차, σ는 누설계수, σ_1과 σ_2는 전류모델과 전압모델의 주파수 밴드폭을 나타낸 것이다.

2.4 속도 추정

속도 추정을 위해서 MRAS(Model Reference Adaptive System)를 적용하여 광범위한 속도범위에서 만족하는 특성을 얻기 위해서 폐루프 자속관측기에서 얻어진 회전자 자속을 사용하여 속도를 추종한다[3]-[6],[9],[10].

기준모델은 폐루프 자속관측기에서 나오는 회전자 자속을 사용하였으며 식(9)와 같고, 적응 모델은 정지 좌표계에서의 전류모델에 의한 방정식 식(10)과 같다[3],[5].

$$\begin{bmatrix} \Phi^s_{qr} \\ \Phi^s_{dr} \end{bmatrix} = \frac{L_r}{L_m}\begin{bmatrix} \Phi^s_{qs} \\ \Phi^s_{ds} \end{bmatrix} - \frac{L_s L_r - L_m^2}{L_m}\begin{bmatrix} I^s_{qs} \\ I^s_{ds} \end{bmatrix} \quad (9)$$

$$P\hat{\Phi}^s_{qr} = -\frac{1}{T_r}\hat{\Phi}^s_{qr} + w_r\hat{\Phi}^s_{dr} + \frac{L_m}{T_r} I^s_{qs}$$

$$P\hat{\Phi}^s_{dr} = -\frac{1}{T_r}\hat{\Phi}^s_{dr} - w_r\hat{\Phi}^s_{qr} + \frac{L_m}{T_r} I^s_{ds} \quad (10)$$

여기서, L_s는 고정자 인덕턴스, L_r은 회전자 인덕턴스, w_r은 전동기 각속도, Φ_{rdq}은 기준모델의 회전자 자속, $\hat{\Phi}_{rdq}$은 추종된 회전자 자속이다.

전동기 속도는 PID adaptive mechanism에 의해서 계산되며 식(11)과 같다.

$$\hat{w}_r = (K_{Pw} + K_{Iw}\frac{1}{S} + K_{Dw}S)e \quad (11)$$

기준 모델(9)과 적응 모델(10)사이의 에러는 식(12)와 같다.

$$e_w = \hat{\Phi}_{rd}\Phi_{rq} - \hat{\Phi}_{rq}\Phi_{rd} \quad (12)$$

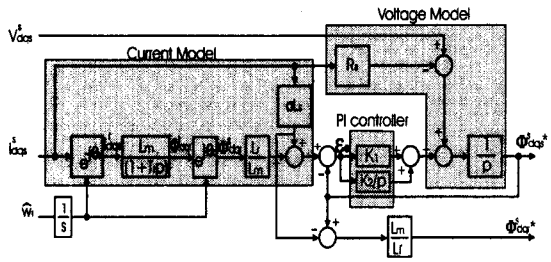


그림 1. 페루프 자속 관측기

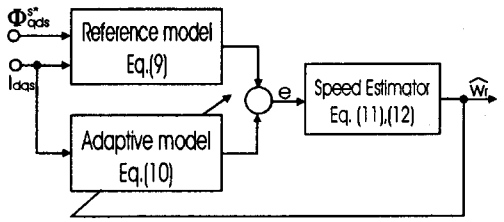


그림 2. MRAS 속도 관측기

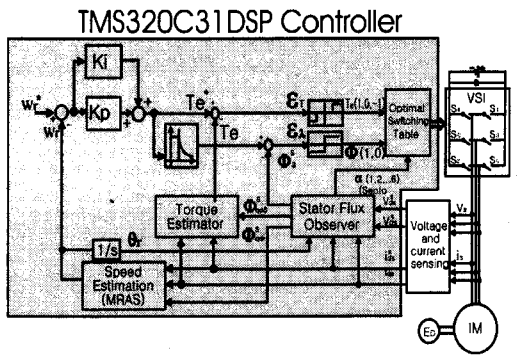
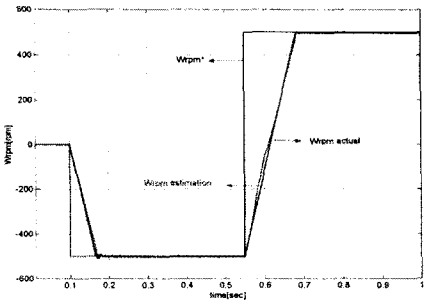


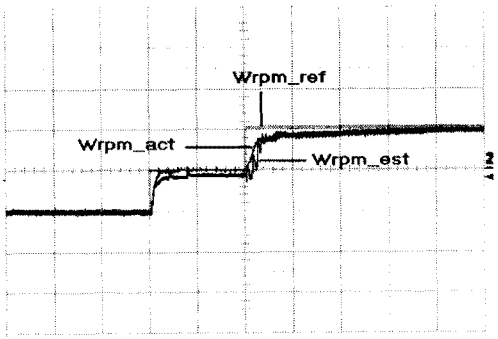
그림 3. DTC를 이용한 속도제어 시스템

표 2. 적용된 전동기의 파라미터

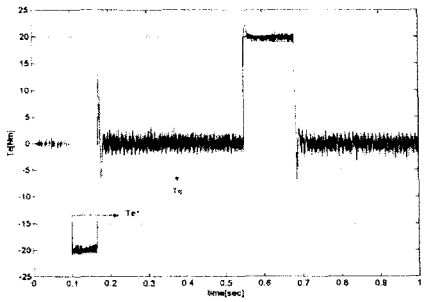
정격극수	2극	Ls	79.156[mH]
정격출력	2.2[Kw]	Lr	79.156[mH]
정격전압	220[V]	Lm	75.01[mH]
정격전류	8.2[A]	Rs	0.713[Ω]
회전자시상수	0.102	Rr	0.773[Ω]
자속 히스테리 시스 제어기의 밴드= $T^*_e \times 0.01$ 토크 히스테리시스 제어기의 밴드= $\lvert\Phi^*_s\rvert \times 0.01$			
속도 제어기		K_{SP}=0.11 K_{SI}=0.069	
Adaptive mechanism		K_{WP}=500, K_{WI}=16000 K_{WD}=650	



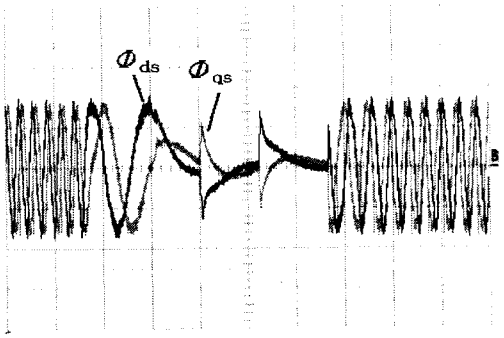
(a)속도 파형



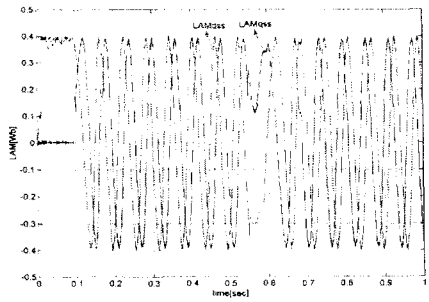
(a)속도 파형



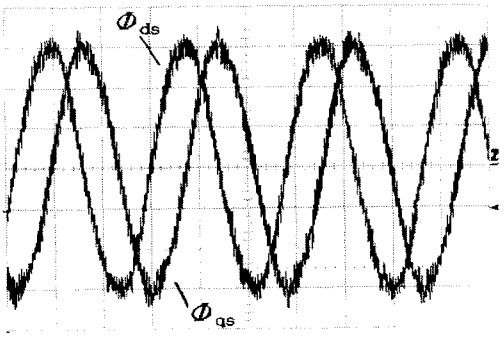
(b)토크 파형



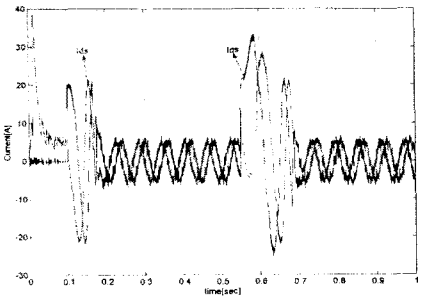
(b)과도 상태시 자속 파형



(c)자속 파형

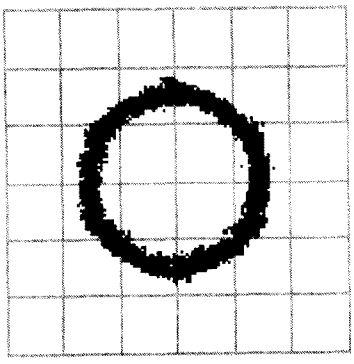


(c)정상 상태시 자속 파형

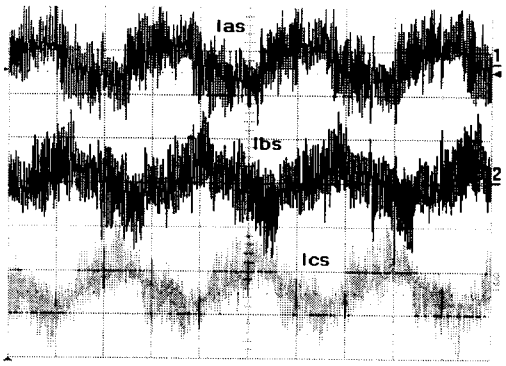


(d)전류 파형

그림 4. Simulation 결과



(d)정상 상태시 고정자 자속의 리샤츄 도형



(e)상전류 파형
그림 5. 실험 결과

III. 시스템 구성

직접 고정자 자속과 토크제어에 의한 유도전동기의 속도센서 없는 제어 시스템을 구현하기 위하여 그림 4와 같은 시스템을 구성하였으며 TMS320C31을 이용하여 소프트웨어적으로 제어된다. 속도제어는 PI 제어기, Adaptive mechanism은 PID 제어기를 사용하였으며, 자속은 2레벨, 토크는 3레벨의 히스테리시스 벤드 제어기를 사용하였다. 부하는 전동기와 직결된 직류발전기의 부하저항을 사용하였다.

IV. 시뮬레이션 및 실험 결과

본 연구에서 제안된 그림 3의 속도 센서 없는 제어 시스템에서 제어기의 정수 결정은 시행오차에 의하여 결정하였으며, 시뮬레이션 및 실험에 적용된 전동기의 정격 및 정수는 표 2와 같다.

4.1 시뮬레이션 결과

시뮬레이션은 Matlab으로 수행하였다. 그림 4는 기준속도를 -500[rpm]에서 500[rpm]의 지령을 주었을 경우 1초동안 제시된 제어시스템의 응답특성을 나타낸 것으로, (a)는 속도 응답, (b)는 토크 응답, (c)는 자속 파형 그리고 (d)는 전류 파형을 나타내고 있다.

4.2 실험 결과

실험에 적용된 제어용 DSP는 TI사의 TMS320C31 60[Mhz]0을 사용하였다. 전류 제어주기는 100 [usec], 속도 제어주기는 500[usec], 속도 추정 주기는 100[usec]로 설정되었으며, 실제 실험에 사용된 제어기의 정수는 표2와 같다.

그림5는 실시스템의 실험결과를 나타내고 있으며 -500 [rpm]에서 0[rpm]으로 다시 500[rpm]으로 정역의 지령 속도를 주었을 때의 응답특성을 나타내고 있이며, (a)는 속도 응답, (b)는 정상상태에서의 전류, (c)는 과도 상태시의 고정자 자속 응답, (d)는 정상상태에서의 고정자 자속파형의 리사츄 도형, 그리고 (e)는 3상전류 파형을 나타내고 있다.

V. 결 론

본 논문에서는 직접토크제어 시스템의 성능에 매우 큰 영향을 주는 자속을 고속에서 뿐 아니라 저속에서도 적용할 수 있게 하기 위해서 폐루프 자속관측기를 사용하였으며 속도 추정은 MRAS를 사용하였다. 제안된 제어 알고리즘과 시스템의 적용가능성을 확인하기 위해서 시뮬레이션을 통해 검증하였으며, 개발된 제어 프로그램과 시스템의 운전특성을 조사하기 위하여 IGBT 전압원 인버터에 2.2Kw 범용 유도전동기를 적용하여 속도센서 없는 DTC의 응답특성을 고찰한 결과 시뮬레이션에서와 같이 실험에서도 우수한 동적 특성이 얻어짐을 보여 주었다.

참 고 문 헌

[1] 김민회, 김남훈, "DSP를 이용한 유도전동기 디지털 제어시스템", 한국산업응용학회 논문집, Vol. 3, No. 1, pp. 9-15, 2000

[2]김민회, 김남훈, 김민호, "직접 토크 및 자속 제어에 의한 유도전동기의 위치제어 시스템" 대한 전기학회 논문지, 제49P 권 제2호 pp.22-28, Cct 2000

[2]Jehudi Maes, Jan A. Melkebeek, "Speed-sensorless Direct Torque Control of Induction Motors Using an adaptive flux observer", IEEE Trans. IA. Vol. 36, NO. 3, pp778-785, May/June 2000

[3] Cristial Lascu, Ion Boldea, Fred Blaabjerg, "A modified Direct Torque Control fot Induction Motor Sensorless Drive", IEEE Trans. IA. Vol. 36, NO. 1, pp. 122-130, Jan 2000

[4] Iron Boldea "Electric Drives", CRC Press, 1999

[5] Peter Vas, "Sensorless Vector and Direct Torque Control", Oxford Press, 1998

[6] Perer Vas "Artificial-Intelligence-Based Electrical Machines and Drives", Oxford Press. 1999

[7] James N. Nash, "Direct Torque Control, Induction Motor Vector Control Without an Encoder", IEEE Trans. IA, Vol. 3, No. 2, pp. 333-341, March/April, 1997

[8] Bimal K. Bose, "Power Electronics and Variable Frequency Drivers, IEEE Press, 1997

[9] P. L. Jansen, R. D. Lorenz, D. W. Novotny " Observer-Basec Direct Field Orientation : Analysis and Comparison of Alternative Methods", IAS-Annual meeting, pp.536-543, 1993

[10] P. L. Jansen, R. D. Lorenz, "A physically insigntful approach to the design and accuracy assessment of flux observes for the field oriented I.M drives." IEEE Trans. IA., Vol. 30, pp.101-110, Jan/Feb. 1994.

[11] P.L. Jansen, R. D. Lorenz, and Donald W. Novotny, " Observer-Based direct field orientation:Analysis and Comparison of Alternative mechods" IEEE Trans. IA., vol. 30, No. 4, July/August 1994

[12] I. Takahashi, T.Noguchi, "A new quick response and high efficiency strategy of an induction motor" in Conf. Rec. IEEE-IAS Annu. Meeting 1985, pp 495-502

[13] M. Depenbrock, "Direct self control for high dynamics performance of inverter feed AC machines,"ETZArch., Vol.7, No.7, pp.211-218, 1985

[14] H. Kubota and K. Matsuse, "Speed sensorless field-oriented control of induction motor with rotor resitance adaptation" IEEE Trans. IA, Vol. 30, pp. 1219-1224, Sept./Oct. 1994

[15] H. Kubota K. Matsuse and T. Nakano, "DTC-based speed adaptive flux observer of induction motor." IEEE Trans. IA., Vol. 29, pp344-348, Mar./Apr. 1993

[16] H. Kubota and K. Matsyse, "DSP-based speed adaptive flux observer of induction motor," IEEE Trans. IA., vol. 29, pp 344-348, Mar./Apr. 1993

[17] G. Yang and T.-H. chin, "Adaptive-speed identification scheme ofr a vector-controlled speed sensorless inverter-induction motor drive" IEEE Trans. IA., Vol. 29, pp.820-825, July/aug. 1993.

[18] D. W. Novotny, T. A. Lipo "Vector control and dynamic of AC drives" Oxford University Press, 1996