

## 신경망을 이용한 리럭턴스 동기전동기(Reluctance Synchronous Motor)의 인덕턴스 보상에 관한 연구

김민희\*, 김남훈\*\*, 백원식\*\*, 박홍일\*\*, 김동희\*\*  
\*영남이공대학, \*\*영남대학교

### A Study on Inductance compensation of Reluctance Synchronous Motor with Neural Network

Min-Huei Kim\*, Nam-Hun Kim\*\*, Won-Sik Baik\*\*, Hong-Il Park\*\*, Dong-Hee Kim\*\*  
\*Yeungnam college of Science & Technology, \*\*Yeugnam University

**Abstract** - This paper presents an implementation of high-dynamic performance control system of Reluctance Synchronous Motor(RSM) drives for an industrial servo drive system with direct torque control(DTC). The estimation of the stator flux and torque are obtained by using flux observer which a saturated inductance  $L_d$  and  $L_q$  of d-q axes can be compensated by using the neural network from measuring the modulus and angle of the stator current space vector. To obtain fast torque response and maximum torque/current, the reference command flux is ensured by imposing  $I_{ds}=I_{qs}$ . The control strategy is proposed to fast response and optimal efficiency for RSM drive. The developed digitally high-performance control system are shown a good response characteristic of control results and high performance features using 1.0kW RSM.

**Key Words:** DTC, RSM, Maximum Torque Control, Compensated Stator Flux Observer, Neural Network,

즘을 제시하고, 실제로 측정된 고정자 자속의 전류곡선을 사용하여 부하변화에 따라 최대토크를 발생하는 지점에서 운전되도록 신경회로망을 사용한 고정자 자속의 기준자령값이 단위전류당 최대토크를 발생하는 값으로 설정되는 직접토크제어에 의한 리럭턴스 동기전동기의 고성능제어 시스템을 제시하였으며, 이의 타당성을 입증하기 위하여 연구용으로 설계 제작된 1.0[Kw] 동기전동기를 적용하여 시스템의 동특성을 확인하였다.

## 2. RSM의 특성과 제어

### 2.1 전압 및 토크방정식

리럭턴스 동기전동기의 벡터도는 그림 1에서 보여주고 있다. 자기포화를 무시하면, 리럭턴스 동기전동기의 전압 방정식과 운동방정식은 회전자 동기좌표계의 d-q 모델로 표시하면 다음 (1)로 표시되며, 토크는 식(2)로 유도되고, 그리고 자속은 식(3)과(4)로 표시된다. 여기서  $L_{ls}$ ,  $L_{md}$ ,  $L_{mq}$ 는 고정자 누설자속과 d축 및 q축의 자기 인덕턴스이며,  $R_s$ 는 상당 고정자 저항이다.<sup>(9)</sup>

## 1. 서 론

최근 급속도로 발전되고 있는 산업분야에서 서보구동용 제어시스템은 고도의 정밀도와 빠른 응답특성을 갖는 시스템이 필수적이다. 최근에는 제어구조가 디지털 형태로 아주 단순하면서 많은 제어기와 복잡한 연산을 요구하지 않고, 토크의 동적특성이 전동기의 정수변화에 영향이 적으면서 직접 전동기의 토크와 고정자 자속을 독립적으로 제어할 수 있는 직접 토크제어 구동 시스템에 대한 연구가 집중되고 있다.<sup>(1)-(15)</sup>

고성능 제어용 전동기로는 유도전동기와 동기전동기가 산업용으로 많이 적용되고 있으며, 유도전동기는 복잡한 제어 알고리즘으로 구현에 어려움이 따르며, 동기전동기는 회전자에 영구자석을 사용함으로써 소형 및 고효율전동기로 널리 이용되고 있으나 가격 상승과 구조적인 문제점이 대두되고 있다. 이에 따라 회전자에 영구자석을 사용하지 않고 유도전동기의 형태를 가지면서 자기적 돌극성에 의해 토크가 발생하는 리럭턴스 동기 전동기(RSM, Reluctance Synchronous Motor)가 산업의 발전과 제작기술의 향상으로 구동에 관한 많은 연구가 이루어지고 있다. RSM은 저가의 가격으로 제작할 수 있는 장점을 가지지만, 회전자 설계시 제한된  $L_d/L_q$  비에 의하여 역률과 출력토크가 결정된다는 특징이 있으며, 설계된  $L_d$ 와  $L_q$ 값이 부하에 따라 비선형적으로 변하므로 정밀 제어에 있어서는 인덕턴스 보상이 요구된다. 또한, RSM의 고정자 자속은 전류에 직접 비례하므로, d-q축 전류를 똑같이 분배함으로써 전동기의 동손이 최소화되어 단위전류당 최대 토크를 발생하여 빠른 응답특성을 유지하면서 효율 최대화 운전의 수행을 가능하게 한다.<sup>(2),(6)-(9),(13),(14)</sup> 이에 따라 본 연구에서는 자속관측기에 사용된 인덕턴스를 고정자 전류벡터를 적용하여 부하변화에 따른  $L_d$ ,  $L_q$ 를 보상하는 제어알고리

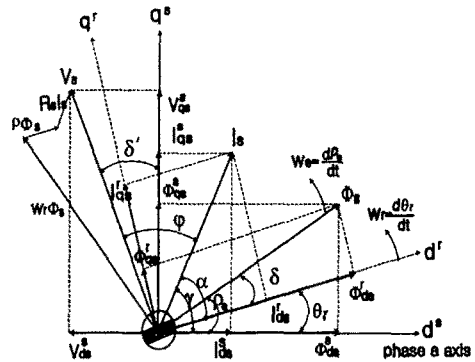


그림 1. RSM의 벡터도

Fig. 1. Vector diagram of a RSM

$$V_{ds} = R_s I_{ds} + \frac{d \Phi_{ds}}{dt} - \omega_r \Phi_{qs} \quad (1)$$

$$V_{qs} = R_s I_{qs} + \frac{d \Phi_{qs}}{dt} + \omega_r \Phi_{ds}$$

$$T_c = \left(\frac{3}{2}\right) \left(\frac{P}{2}\right) (\Phi_{ds}^s I_{qs}^s - \Phi_{qs}^s I_{ds}^s) \\ = \left(\frac{3}{2}\right) \left(\frac{P}{2}\right) (L_d - L_q) I_s \frac{\sin(2\alpha)}{2} \quad (2)$$

$$\Phi_{ds} = L_{ls} I_{ds} + L_{md} I_{ds} = L_d I_{ds} \\ \Phi_{qs} = L_{ls} I_{qs} + L_{mq} I_{qs} = L_q I_{qs} \quad (3)$$

$$|\Phi_s| = \sqrt{\Phi_{ds}^2 + \Phi_{qs}^2} \quad (4)$$

$$= I_s \sqrt{(L_q)^2 \sin^2(\alpha) + (L_d)^2 \cos^2(\alpha)}$$

## 2.2 부하에 따른 자속과 인덕턴스

식(2)에서 보는 것처럼, 토크는 고정자 전류벡터  $I_s$ 의 크기와 인덕턴스 차이의 변화 및 변위각  $\alpha$ 에 의존됨을 알 수 있다. 그러므로 RSM의 출력 토크는 고정자 전류의 즉각적인 변화에 대응되며, 이는 유도전동기의 벡터 제어에서처럼 선형적인 우수한 동적 응답특성을 얻기 위하여 일정한 자속을 유지할 필요가 없음을 의미한다. 또한 부하변화에 따라 고정자 자속을 변화시키므로 전류에 대한 토크의 비를 최대화 할 수 있다. 단위 전류당 최대 토크(Torque/Ampere)의 발생은  $I_{ds}=I_{qs}$  일 때와 가변자속제어를 채용할 경우에 얻을 수 있다.

직접토크제어에서는 빠른 토크응답을 얻기 위하여 일정한 고정자 자속의 크기를 유지할 필요는 없다. 따라서 빠른 토크 응답은 고정자 전류의 크기 변화에 의하여 얻어질 수 있으며, 단위 전류 당 최대 토크는  $I_{ds}=I_{qs}$ 를 유지함으로써 확보할 수 있다. 고정자 전류가 주어지고,  $L_d > L_q$ 인 경우,

$\alpha = 90^\circ$  일 때 고정자 자속의 크기는 최소가 되고,  $\alpha = 0^\circ$  또는  $180^\circ$ 에서 최대가 된다. 따라서 제시된 제어방법은 고정자 전류의 위치가  $\alpha = 45^\circ$ 에서 유지 되도록 동작된다.<sup>[9][14]</sup>

그림 2는 1kW RSM을 사용하여 실험에 의하여 얻어진 고정자 전류의 크기와 변위 각에 따라 측정된 자속을 보여준 것이며, 그림 3은 d-q축 전류 변화에 따라  $L_d$  및  $L_q$ 의 변화를 측정하여 얻어진 결과이다.

## 2.3 고정자 자속 관측기

그림 4는 본 연구에서 적용한 넓은 속도 범위에서 우수한 특성이 얻어지는 전압 전류 모델로, 안정된 자속을 얻기 위하여 고정자 자속을 피드백하여 적용하는 자속 관측기이다. 여기서 각 부분의 수식은 (5)-(9)에서 나타내었다<sup>[1)-(3)]</sup>.

$$I_{qds}^r = \text{Exp}(-j\theta_r) I_{qds}^s \quad (5)$$

$$\Phi_{qds}^r = L_{qd} I_{qds}^r \quad (6)$$

$$\Phi_{qds}^s = \Phi_{qds}^r \text{Exp}(j\theta_r) \quad (7)$$

$$\dot{\Phi}_{qds}^s = \int [(V_{qds}^s - R_s I_{qds}^s) + \epsilon_\theta (K_P + \frac{K_I}{P})] dt \quad (8)$$

$$\epsilon_\theta = (\Phi_{qds}^s - \Phi_{qds}^{s*}) \quad (9)$$

여기서,  $I_{qds}^r$ 은 동기좌표계상에서의 전류,  $I_{qds}^s$ 는 정지좌표계상의 전류,  $\Phi_{qds}^r$ 은 동기좌표계상의 자속,  $\Phi_{qds}^s$ 는 정지좌표계상에서의 자속,  $K_P$ 와  $K_I$ 는 자속관측기의 이득을 나타낸다.

## 2.4 신경회로망을 이용한 자속 및 인덕턴스 보상

그림 2와 3에서는 실 시m템을 이용하여 부하전류의 크기와 변위각( $\alpha$ )에 따른 고정자 쇄교자속의 비선형적인 변화 곡선과  $L_d$  및  $L_q$ 의 철심포화에 의한 변화상태를 보여주었다. 위 그림에서 알 수 있는 바와 같이 부하 전류벡터의 변화에 따라 자속과 인덕턴스가 복잡하게 비선형적으로 변화된다. 이를 제어 시스템에 적용하기 위하여 그림 5와 같이 Back Propagation Training의 신경회로망을 설계하였으며, 학습을 위하여 Neural Ware사의 Neural Works Professional II/plus V. 5.4를 사용하였다. 신경회로망의 입력은 부하전류의 크기와 변위각이며 출력은 단위 전류당 최대 토크를 발생하는 기준저령자속과 보상된  $L_d$  및  $L_q$ 이며, Hidden layer는 6으로 설정하였다<sup>[6][10]</sup>.

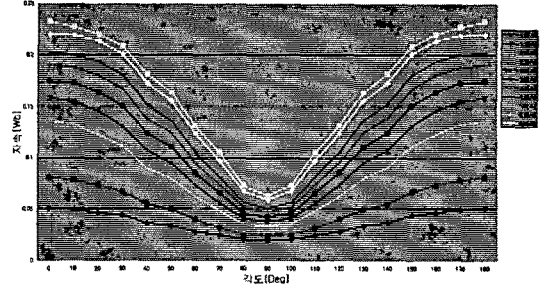


그림 2 고정자 전류진폭과 변위각 변화에 따라 측정된 자속곡선  
Fig. 2. Measured flux curves for different stator current amplitudes and angular displacement

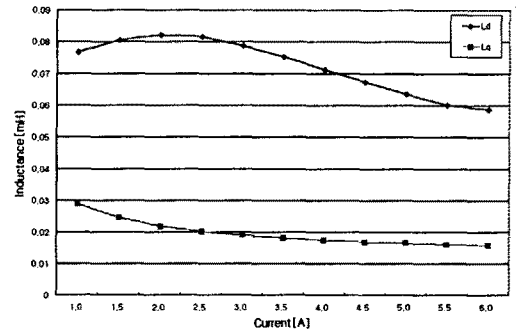


그림 3. 전류 변화에 따른 측정된 d-q축 인덕턴스  
Fig. 3. Measured direct axis inductance( $L_d$ ) and quadrature axis inductance( $L_q$ ) versus stator current( $I_s$ )

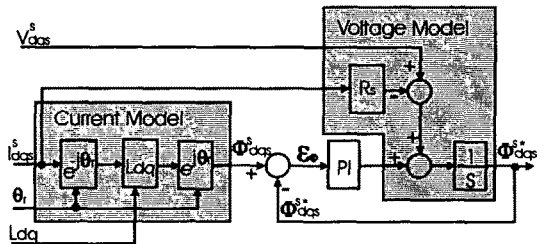


그림 4. RSM의 고정자 자속관측기  
Fig. 4. Stator flux observer for RSM

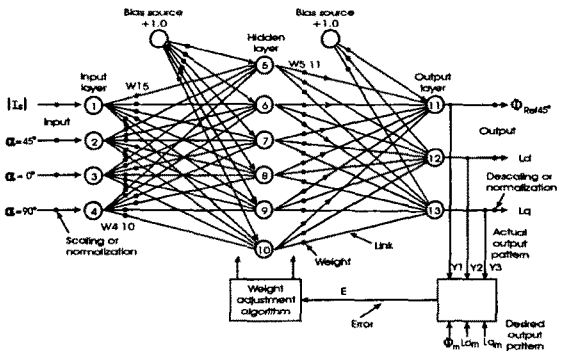


그림 5. 최대 토크제어를 위한 역전파 학습기의 구조  
Fig. 5. Structure of Back Propagation Training for maximum torque control

### 3. 시스템 구성

직접 토크제어에 의한 위치 검출기 없는 리럭턴스 동기전 동기의 제어 시스템을 구현하기 위하여 그림 3과 같은 제어 시스템을 구성하였다. 속도제어는 PI 제어기를 사용하였으며, 토크 및 고정자 자속 추정은 전동기 단자에서 측정된 전압전류를 사용한 전압전류모델 관측기를 이용하였으며, 자속은 2레벨로, 토크는 3레벨의 히스테리시스 밴드 제어기를 사용하였다.

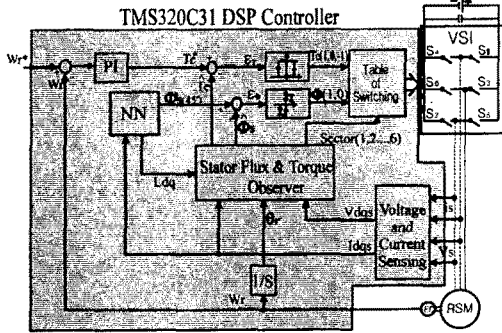


그림 6. 제시된 RSM 제어시스템  
Fig. 6. Proposed control system of RSM

### 4. 실험결과

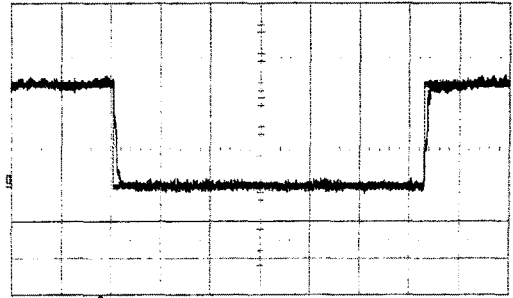
#### 4-1. 실험결과

표 1은 본 연구에서 적용된 시스템의 파라미터를 나타낸 것이다. 그림 6에서 제시된 제어시스템의 제어기 이득 결정은 시행오차에 의하여 결정되었으며 표 2와 같다. 그림 7은 본 연구에서 제안하는 RSM 제어시스템의 저속영역 (+100 - 0 - +100rpm)의 운전에서 속도제어의 실험결과를 보여준 것이다. 이때 부하는 2[Nm]를 인가하였고, 파우더 브레이크 동력제어 장치를 사용하였다. (a) 속도제어 응답특성, (b) 토크제어 응답 특성, (c) 고정자 자속파형 그리고 (d) 고정자 전류파형을 보여 준 것이다.

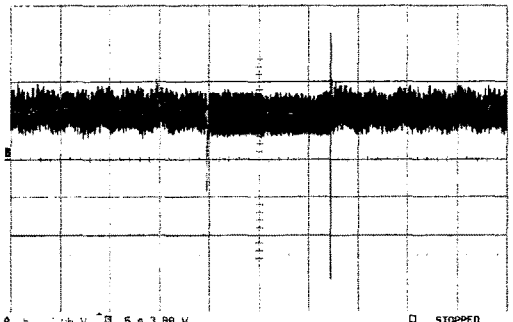
그림 8은 고속영역인 +1500rpm(+1500-0--1500rpm)의 정역운전에서 위치제어 실험결과를 보여준 것이다. (a)는 속도제어 응답 특성, (b) 과도상태에서의 확장된 속도파형, (c)는 과도상태에서 정역운전시 확장된 d-q축 고정자 자속의 파형을 보여준 것이다.

표 1. 적용된 전동기와 시스템 파라미터  
Table 1. Applied Motor and system parameters

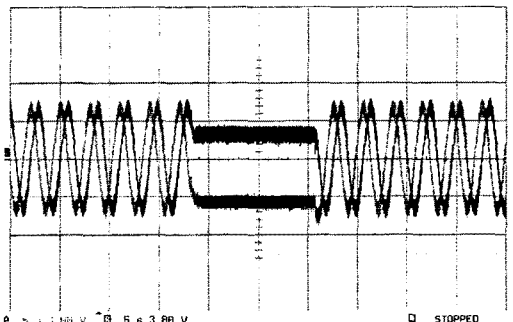
구분	Parameters
정격출력	1 kW
정격회전수	2400 rpm
정격부하	4.2 N.m
정격전류	5.0 A
Ld	72.0 mH
Lq	28.0 mH
고정자 극수	4
회전자 극수	4
자속 Hys. 밴드폭	$ \Phi_s^*  \times 0.05$
토크 Hys. 밴드폭	$ T_e^*  \times 0.05$
자속 관측기	$K_p = 125, K_i = 628$
속도제어기	$K_p = 0.49, K_i = 1.0$



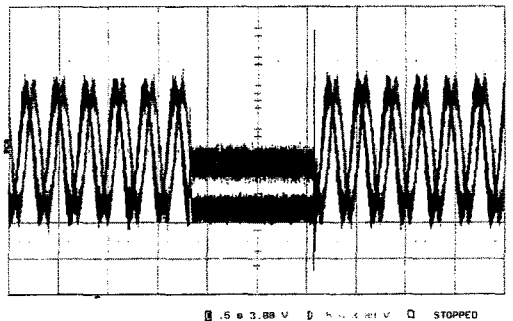
x=0.2[sec/div] y=35[rpm/div]  
(a) 속도제어 응답특성



x=0.5[sec/div] y=2[Nm/div]  
(b) 토크제어 응답특성



x=0.5[sec/div] y=1.5[Wb/div]  
(c) 고정자 자속파형



x=0.5[sec/div] y=3[A/div]  
(d) 고정자 전류파형

그림 7. 정상상태 100rpm에서의 실험결과  
Fig. 7. Experiment results of proposed drive system at 100rpm

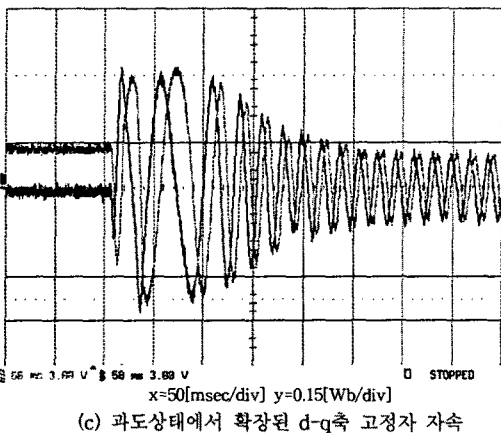
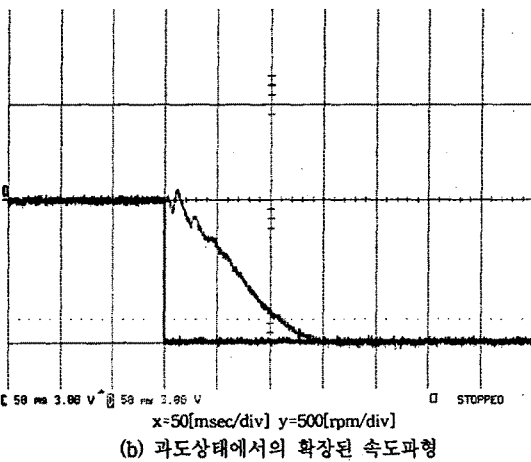
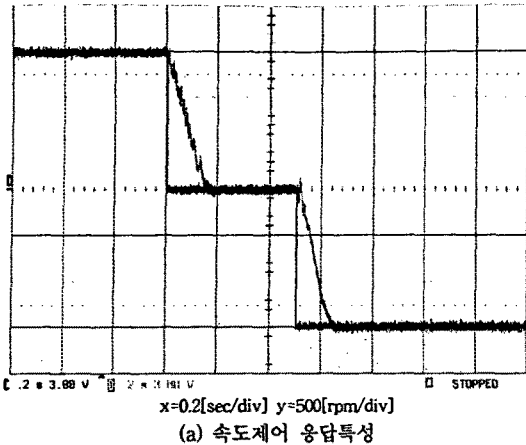


그림 8. 정상상태 ±1500rpm에서의 실험결과

Fig. 8. Experiment results of proposed drive system at ±1500rpm

## 5. 결론

본 연구에서는 자속관측기에 사용된 인덕턴스를 고정자 전류벡터를 적용하여 부하 변화에 따른  $L_d$  및  $L_q$ 를

보상하는 제어 알고리즘을 제시하였으며, 실제로 측정된 고정자 자속과 전류곡선을 사용하여 부하변화에 따라 최대토크를 발생하는 지점에서 운전되도록 신경회로망을 사용한 고정자 자속의 기준지령 값이 단위 전류 당 최대 토크를 발생하는 값으로 설정되는 직접토크제어에 의한 리럭턴스 동기전동기의 고성능제어 시스템을 제시하였다. 제시된 알고리즘의 타당성을 검증하기 위하여 연구용으로 설계 제작된 회전자자의 구조가 멀티전위 장벽형으로, 리럭턴스 비( $L_d/L_q$ )가 2.57을 가진 1.0 kW 리럭턴스 동기전동기를 적용하여, TMS320C31 DSP 제어기와 IGBT 전압형 인버터에 의해 구동하는 제어시스템을 구성하여 실험을 실시하였다. 실험결과 제시된 알고리즘과 구동시스템은 100rpm의 저속영역과 ±1500rpm의 고속영역에서도 우수한 응답특성이 얻어짐을 확인하였다.

## (참고 문헌)

- [1] 김민희, 김남훈, 최경호, "직접 토크제어에 의한 리럭턴스 전동기의 고성능 위치제어 시스템," 대한전기학회 논문지, 제 51B권 제3호 pp 150-157, Mar. 2002.
- [2] 김민희, 김남훈, 백원식, "직접 토크제어에 의한 위치검출기 없는 리럭턴스 전동기의 고성능 제어시스템," 전력전자학회 논문지, 제7권 제1호, pp. 81-89, 2002. 2월
- [3] 김민희, 김남훈, 김민호, "직접 토크 및 자속 제어에 의한 유도전동기의 위치제어 시스템," 대한전기학회 논문지, 제 49P권 제2호 pp.22-28, Oct 2000.
- [4] Jehudi Maes, and 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.
- [5] Cristial Lascu, Ion Boldea, and Fred Blaabjerg, "A modified Direct Torque Control for Induction Motor Sensorless Drive," IEEE Trans. IA., Vol. 36, NO. 1, pp. 122-130, Jan 2000.
- [6] Bimal K. Bose, "Power Electronics and Variable Frequency Drives," IEEE Press, 1997.
- [7] Peter Vas, "Sensorless Vector and Direct Torque Control," Oxford Press, 1998.
- [8] Iron Boldea, "Electric Drives," CRC Press, 1999.
- [9] Iron Boldea, "Reluctance Synchronous Machines and Drives," Oxford Science, 1996.
- [10] Min-Huei Kim, M. Godoy Simoes, Bimal K. Bose, "Neural Network-Based Estimation of Power Electronic Waveforms", IEEE Transection on power Electronics, Vol. 11, No. 2, pp. 383-389, March 1996.
- [11] Bimal K. Bose, "Modern Power Electronics and AC Drives", Prentice Hall PTR, 2002
- [12] Rolf Lagerquist, Ion Boldea, and Tim J. E. Miller, "Sensorless Control of the Synchronous Reluctance Motor," IEEE Trans. on IA., Vol. 30, No. 3, pp.673-682, May, 1994.
- [13] Hyeoun-Dong Lee, Seog-Joo Kang, and Seung-Ki Sul, "Feeciency-Optimized Direct Torque Control of Synchronous Reluctance Motor using Feedback Linearization," IEEE Trans. on IE., Vol. 46, No. 1, pp.192-198, Feb. 1999.
- [14] Alfio Consoli, and Galogero Cavallaro "Sensorless Torque Control of Synrcel Motor Drives," IEEE Trans. on PE., Vol. 15, No.1, pp. 28-35, Jan. 2000.
- [15] H. Murakami, Y. Honda, S. Morimoto, and Y. Takeda, "Performance Evaluation of Synchronous Reluctance Motor and the Order motors with the Same Distributed Winding and Stator Configuration," T.IEEE Japan, Vol. 120-D, No.8/9, pp. 1062-1074, 2000.