

SRM의 고정도 온, 오프 각 제어를 위한 선형 엔코더에 관한 연구

홍정표*, 박성준**, 홍순일***, 김철우*
 부산대학교*, 동명대학**, 부경대학교***

Study on the Linear, Encoder for high performance On Off control of SRM

Jeng-Pyo Hong*, Sung-Jun Park**, Sun-Il Hong*** Cheul-U Kim*
 Pusan National Univ.*, Dong-Myong College**, Pukyong National Univ.***

Abstract - In switched reluctance motor(SRM) drive, it is necessary to synchronize the stator phase excitation with the rotor position. Therefore the rotor position information is an essential. Usually optical encoders or resolvers are used to provide the rotor position information. These sensors are expensive and are not suitable for high speed operation.

In the paper, the low cost linear encoder suitable for the practical and stable SRM drive is proposed and the control algorithm to provide the switching signals using the simple digital logic circuit is also presented in this paper. It is verified from the experiments that the proposed encoder and logic controller can be a powerful candidate for the practical low cost SRM drive.

1. 서 론

스위치드 릴럭턴스 전동기(Switched Reluctance Motor, SRM)는 단일 여자기기로 구조가 간단하고 저렴하며 각 상의 분리로 단락사고에 대해 안정적이며, 직류전동기의 속도-토크 특성을 가지고 있고 넓은 속도 가변범위 및 고속, 정 역 회전특성이 우수하고 강인하다는 특성을 가지고 있다. SRM에 대한 연구는 선진국을 중심으로 가전기기, 전기자동차, 항공기 및 산업전반에 그 응용영역을 확대해 가는 연구와 개발이 진행되고 있다.[1][2]

SRM은 릴럭턴스 토크를 극대화하기 위해 회전자와 고정자가 모두 돌극형의 구조를 가지며 권선은 회전자에만 집중권으로 감겨 있어 전자계 구조상 단속적인 여자 전원이 각 상권선에 순차적으로 인가되어 구동되므로 낮은 스위칭 주파수로 운전이 가능하여 고속 운전이 가능한 장점을 갖지만, 회전자 위치정보가 필수적이라는 취약점을 가지고 있다[3][4]. 회전자 위치각의 검출은 일반적으로 엔코더나 레졸버를 사용하나, 가격이 비싸서 설치비용에 대한 부담을 줄이기 위해서 저가형 엔코더를 사용하거나 이를 완전히 제거하기 위한 센서리스 구동에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다[5].

따라서 본 연구에서는 SRM구동을 위한 저가형 선형 엔코더를 제안하고, 제안된 엔코더의 출력신호를 사용하여 간단한 회로에 의해 상스위치 ON·OFF각을 제어하는 방식을 제안하였다. 제안된 상스위치 제어방식에서 스위치 온, 오프각 제어정도는 기존의 일반적인 상스위치 제어방식과 달리 마이크로프로세서의 샘플링주기 및 SRM의 운전속도와 관계없이 항상 원하는 위치에서 ON·OFF스위칭을 행할 수 있다. 따라서 온, 오프각 제어에 의한 광범위한 속도영역에서 안정된 속도제어가 가능할 뿐만 아니라, 엔코더 및 제어를 저가격화와 더불어 구동시스템의 안정화를 구현함으로써 SRM의 실용화 가능성이 실험을 통해 입증되었다.

2. 본 론

2.1 SRM의 동작원리

SRM은 릴럭턴스 토크를 동력화한 전동기로, 이를 위한 이용하기 위하여 보통 고정자와 회전자 모두 돌극형(salient-pole type) 구조로 하고 고정자에만 집중권으로 권선이 감겨져 있다. 이때 토크는 자기회로의 릴럭턴스가 최소화되는 방향으로 발생하며, 상당 발생토크의 크기는 SRM의 토크는 자기적 코에너지 개념으로부터 식 (1)에서와 같이 상권선에 흐르는 전류 i 의 제곱과 회전자 위치각 θ 에 대한 인덕턴스 L 의 변화율에 비례한다.

$$T(\theta, i) = \frac{\partial W(\theta, i)}{\partial \theta} = \frac{1}{2} \frac{dL(\theta, i)}{d\theta} i^2 \quad (1)$$

여기서 T 는 토크, θ 는 회전자의 위치각, i 는 상전류, $W(\theta, i)$ 는 자기적 코에너지를 나타내고, $L(\theta, i)$ 은 고정자와 회전자간의 인덕턴스를 나타낸다.

SRM에서 발생 토크의 한 인자인 상전류 해를 구하기 위한 전압 방정식은 식(2)와 같다.

$$V = Ri + \frac{dL(\theta, i)}{dt} i \quad (2)$$

$$= Ri + L(\theta, i) \frac{di}{dt} + i \frac{dL(\theta, i)}{d\theta} \frac{d\theta}{dt}$$

식(2)의 우변 첫째 항은 권선 저항의 전압강하이며 둘째 항은 리액턴스의 전압강하이고 셋째 항은 속도 역기전력 항이 될과 동시에 기계적인 출력을 나타내는 성분이다. 식(2)으로부터 상전류 해를 구하기 위해서는 SRM의 인덕턴스 프로파일에 대한 정확한 정보가 필수적이다.

2.2. 제안된 엔코더와 제어기

2.2.1. 제안된 엔코더

기존 시스템에서와 같이 마이크로프로세서를 사용하여 SRM의 상스위치를 제어할 경우 그 제어정도는 엔코더의 분해능($\Delta\theta_m$)과 샘플링 주기 동안에 회전자 위치각의 변화($\Delta\theta_m$)에 의해 결정된다.

한 회전당 펄스수가 N_p 인 엔코더에서 기계적 위치각 분해능은 전동기의 속도와 무관하며 그 값은 식(3)과 같다.

$$\Delta\theta_e = \frac{360}{N_p} [\text{deg.}] \quad (3)$$

또한 샘플링 주기 동안에 회전자 위치각의 변화($\Delta\theta_m$)는 전동기의 속도에 좌우되며 그 값은 식 (4)와 같다.

$$\Delta\theta_m = 6 \cdot \omega \cdot T_s [\text{deg.}] \quad (4)$$

T_s : 마이크로프로세서의 샘플링 주기 [s]
 마이크로프로세서를 사용한 상스위치 제어 방식에서 온, 오프각 변동은 엔코더의 분해능과 마이크로프로세서의 샘플링 주기에 의해 결정되며, 그 값은 식(3)과 식(4)로부터 식(5)와 같이 주어진다.

$$\Delta\theta_s = \Delta\theta_m + \Delta\theta_e = 6T_s\omega_r + \frac{360}{N_p} \text{ [deg.]} \quad (5)$$

식(5)를 전동기 속도에 따른 온, 오프각 제어정도론 도식적으로 나타내면 그림 2와 같다.

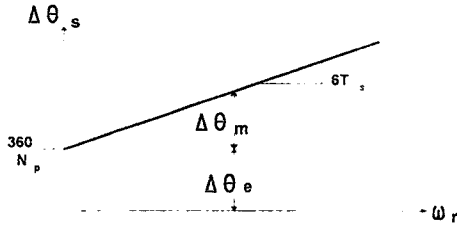


그림 1. 속도에 따른 스위칭각 에라
Fig. 1. Error of switching angle to speed

그림 1에서 알 수 있듯이 전동기의 속도가 증가함에 따라 샘플링에 의한 오차는 $6T_s$ 의 기율기로 증가한다. 또한 엔코더의 분해능과 마이크로프로세서의 위치각 변동이 정수 배로 나타나지 않으면 스위칭각 제어에는 저차 고조파성분이 나타나게 된다. 이로 인하여 SRM의 토크성분에도 동일한 저차 고조파성분이 나타나게 되어 안정화 운전에 악영향을 미치게 된다.

일반적으로 전동기의 속도가 저속인 경우에는 샘플링에 의한 위치각 변동이 엔코더의 각도 분해능 $\Delta\theta_e$ 보다 적으므로 ON·OFF각의 변동은 엔코더의 분해능에 의해 지배를 받게 된다. 그러나 전동기의 속도가 고속이 될수록 엔코더의 분해능은 변동이 없으나 샘플링에 의한 위치각 변동은 크게 나타나게 되며, 이 경우 ON·OFF각의 변동은 샘플링에 의한 위치각 변동에 지배를 받게 된다. 따라서 엔코더가 갖고 있는 정도와 유사한 분해능을 갖는 온, 오프 각을 제어하기 위해서 고속의 샘플링이 요구되며, 이를 위해서는 고성능을 갖는 마이크로프로세서가 필수적이다. 이러한 고속의 마이크로프로세서의 도움을 받지 않고 고정도의 상스위치를 제어하기 위해서는 특별한 제어기법이 필요하다. 따라서 8/6 SRM의 경우 간단한 엔코더를 이용하여 상스위치의 온, 오프를 정밀하게 할 수 있는 방식으로 그림 3과 같이 두 가지 형태의 선형엔코더를 생각할 수 있다.

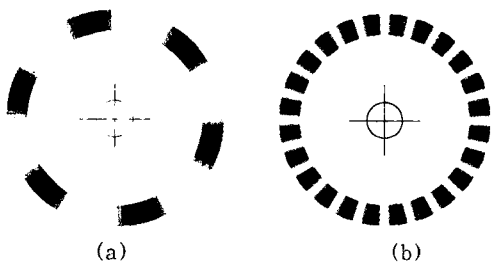


그림 2. 제안된 저가형 엔코더
Fig. 2. Proposed low cost encoder

그림 2에서 제안된 엔코더는 본 실험에 사용되는 8/6 SRM의 경우에 대한 엔코더의 형태이며 엔코더의 기판은 기존의 디지털 방식 엔코더와 달리 엔코더의 기판에 색감을 선형으로 사용함으로써 엔코더가 회전함에 따라 두꺼워지는 광량은 선형적으로 증가 및 감소를 하게 된다. 이로 인하여 포토트랜지스터의 출력은 위치각의 함수로 한 삼각파가 출력된다. 따라서 포토트랜지스터의 출력전압으로 SRM의 회전자 위치를 파악할 수 있다.

제안된 엔코더의 형태에서 엔코더의 출력주기를 그림 3의 (a)와 같이 SRM 인덕턴스의 한 주기에 해당되는 식 (6)과 같이 정의될 수 있다. 8/6 SRM의 경우 주기는 기계각 60° 가 된다. 또한 엔코더의 출력 주기를 한

상이 담당해야 할 변위는 식 (7)과 같이 정의할 수 있다. 8/6 SRM의 경우 주기는 기계각 15° 가 된다.

$$\delta_T = \frac{360}{P_r} \text{ [deg.]} \quad (6)$$

$$\delta_P = 2 \frac{360}{P_s P_r} \text{ [deg.]} \quad (7)$$

단, P_s : 고정자의 극수
 P_r : 회전자 극수

식 (7)에 나타난 펄스폭(δ_P)은 SRM에서 연속적인 토크를 발생시키기 위해 한 상이 담당해야 할 위치각의 폭이 된다.

엔코더의 출력주기를 식 (6)과 같이 정의되면, 상 스위칭을 위한 회전자 위치각을 완전히 얻을 수 있어 기동시에도 회전자의 위치를 파악할 수 있는 장점이 있으나, 엔코더의 출력을 선형으로 만드는 것이 매우 어렵다는 단점으로 인해 동일한 상 전류파형 형성에 매우 큰 어려움이 있다.

엔코더의 출력주기를 식 (7)과 같이 정의되면, 엔코더의 출력이 비선형성으로 나타나더라도 간단한 회로로 동일한 형태의 상스위치를 제어할 수 있는 장점이 있으나, 상 스위칭을 위한 회전자 위치각을 완전히 얻을 수 없어, 기동시 회전자의 위치를 파악할 수 없는 단점이 있다. 본 실험에서는 제안된 엔코더 중에서 엔코더의 출력주기를 식 (7)과 같이 정의되는 그림 3(b)와 같은 형태의 엔코더를 사용하여 SRM의 상스위치를 제어하였다.

이 방식에서는 정회전과 역회전을 위한 두 개의 포토커플러가 필요하다. 엔코더에서 두 개의 포토커플러는 기계각 γ 만큼 위상차를 두고 설치되어 있으며, 각각의 포토커플러는 정 회전을 위한 부와 역회전을 위한 부로 사용된다. 엔코더의 두상의 위상차(γ)는 SRM의 정, 역운전시 동일한 형태의 상스위치를 형성하기 위한 위상차가 되며, 이는 SRM의 프로파일에 의해 결정된다.

2.2.2. 제어기의 구성

그림 3는 제안된 엔코더에 의한 8/6 SRM의 인덕턴스 프로파일과 엔코더 및 상스위치 지령치의 비교에 의해 발생하는 FW, BW의 출력 및 정·역회전 운전시의 각 상의 게이트신호를 나타내고 있다.

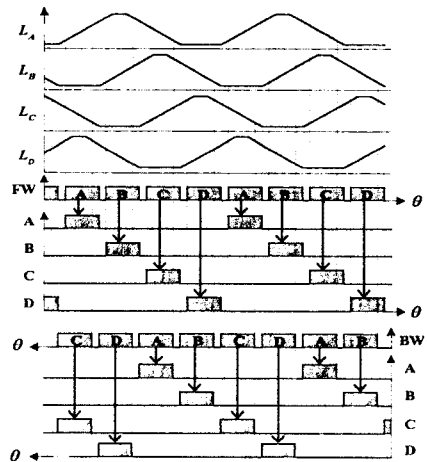


그림 3. 제안된 엔코더에 의한 SRM의 정·역회전 운전시의 각 상의 게이트신호

Fig. 3. Gate signal of each phase when SRM is rotating in the forward and backward directions by the proposed encoder

그림 3에서 보듯와 같이 정회전을 위해서는 FW상 클럭을 기준으로 하여 각 상스위치는 4카운터마다 온

신호로 사용하면 된다. 이를 위해서 4진 카운터와 2/4 멀티플렉스를 조합하여 사용하면 간단히 해결할 수 있다. 역회전을 위해서는 BW상 클럭으로 4 카운터마다 온 신호로 사용하면 된다. 전동기의 정, 역회전 판정은 FW, BW상을 이용하여 기존의 엔코더에서 사용하는 방식을 그대로 사용한다

3. 실험 결과 및 고찰

실험에 사용된 SRM은 고정자와 회전자의 극이 8/6 이고 400W, 2000rpm, 200V기이며 기존의 클래식 인버터를 사용하였다. 이 전동기의 인덕턴스 프로파일은 그림 4이며, 이것은 회전자를 1° 씩 변화시켜가면서 전류한계치를 7A로 하고 이 한계치를 도달할 때까지 전압 펄스를 인가하여 그때의 전류파형을 오실로스코프로 측정 한 뒤, 권선저항을 고려하여 측정 한 전압 및 전류데이터에 의해 인덕턴스를 계산하였다. 따라서 얻어진 인덕턴스 프로파일은 SRM의 다이내믹 운전특성을 나타낼 수 있는 비교적 정확한 값이라 할 수 있다.

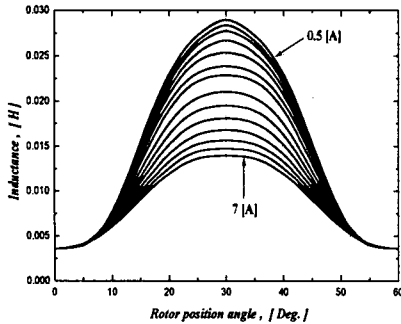
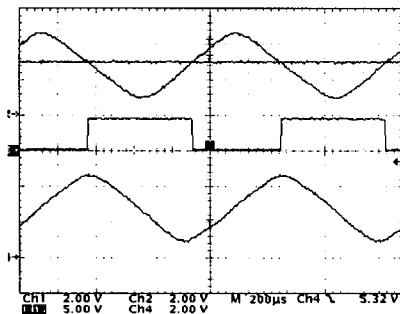


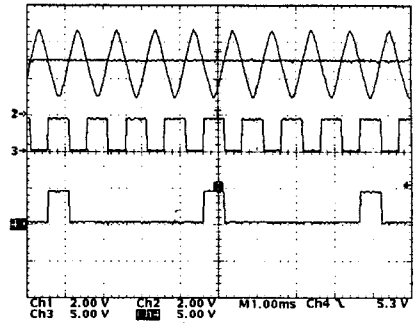
그림 4. SRM 인덕턴스 프로파일
Fig. 4. The inductance profiles of SRM

먼저 SRM이 시계방향으로 회전하고 있을 때를 정회전, 반시계방향으로 회전하고 있을 때를 역회전이라 하면, 그림 5(a)는 SRM이 2500[rpm]으로 정회전하고 있을 때, 두 개의 선형 포토트랜지스터의 출력과 위치각 변위 지령치 및 FW의 출력신호를 나타내고 있다.

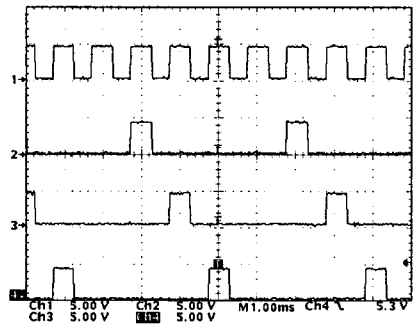
선형 포토트랜지스터의 출력과 위치각 변위 지령치, FW의 출력신호 및 A상의 게이트신호를 그림 5(b)에 나타나 있으며, B~D상 신호는 A상의 신호를 15° 씩 시프트 시켰다. 그림 5(c)는 FW와 A-C상 게이트신호를 나타내고 있다. 그림 5(d)는 각상 게이트신호를 나타내고 있다.



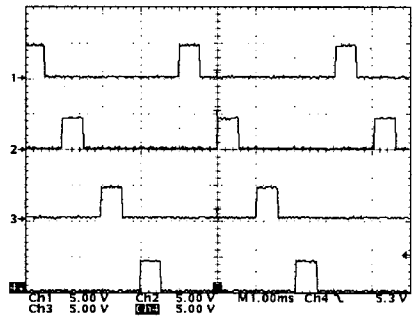
(a) output signals of photo Tr. and encoder



(b) output signals of photo Tr. encoder and gate signal

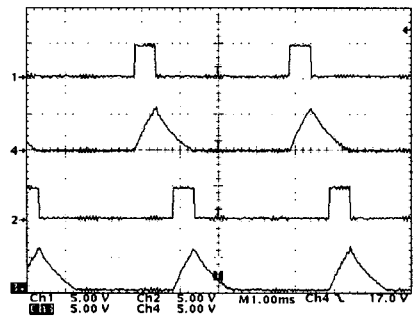


(c) Gate signal and corresponding encoder signal

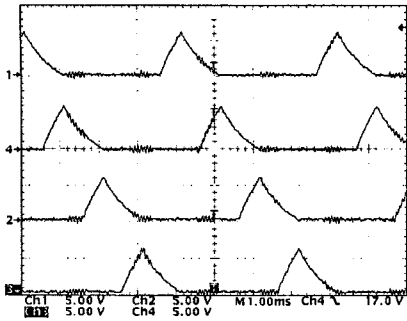


(d) Each gate signals

그림 5. 상스위치 게이트신호 및 상전류 파형 (2500rpm)
Fig. 5. Waveforms of the phase switch gate signals and phase current(2500rpm)

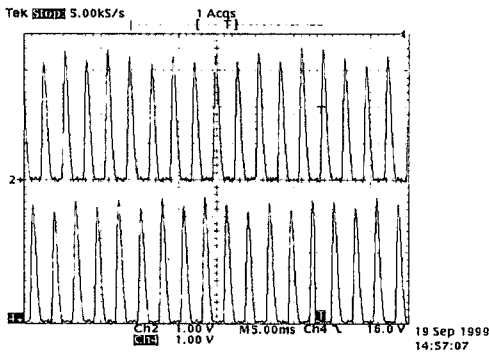


(a) Gate signal and corresponding phase current

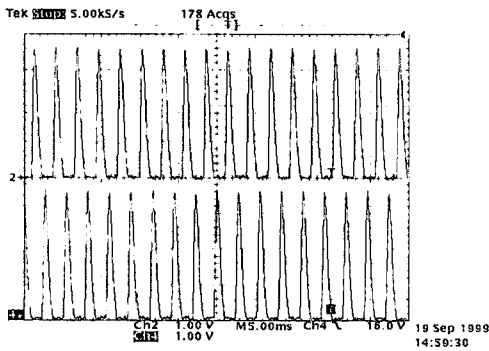


(b) Each phase currents

그림 6. 상스위치 게이트신호 및 상전류 파형(2500rpm)
Fig. 6. Waveforms of the phase switch gate signals and phase current(2500rpm)



(a) Conventional



(b) Proposed

그림 7. 제안된 방식과 기존방식의 상전류 파형 비교 (3600rpm)
Fig. 7. Comparison of phase current waveforms (3600rpm)

그림 6는 SRM이 2500[rpm]으로 정회전하고 있을 때의 실험 결과 파형이다. 그림 6(a)는 정회전시의 A,B상 신호 및 이때의 전류 파형을 나타내고 있으며, 그림 6(b)는 각 상 전류를 나타내고 있다. 그림에서 보는 바와 같이 일정한 회전자위치각에서 상스위치를 ON·OFF함으로써 상전류는 거의 동일한 형태를 가지고 있음을 알 수 있다

그림 7은 SRM이 3600[rpm]으로 정회전하고 있을 때 기존의 마이크로프로세서 방식과 제안된 방식에서 상

스위칭 안정도를 비교하기 위한 실험 결과 파형이다. 그림 7(a)는 마이크로프로세서를 이용한 기존의 스위칭방식으로 상스위치의 온, 오프각 제어정도가 떨어져서 상전류파형이 일정한 형태가 되지 못한다. 이 결과 상도 오프에도 상당한 리플이 있을 것으로 사료된다. 한편, 제안된 상스위칭 방식인 그림 7(b)에서 보는 바와 같이 고속에서도 일정한 회전자위치각에서 상스위치를 ON·OFF시킬 수 있으므로 상전류는 거의 동일한 형태를 가지며, 매우 안정된 속도 및 토오크제어를 행할 수 있음을 보이고 있다. 정확하고 안정된 상스위치의 온, 오프는 정상상태에서 시스템의 안정도에 큰 도움이 된다.

4. 결 론

SRM구동에 있어 고정도 온, 오프제어가 가능한 저가형 선형 엔코더를 제안하고, 제안된 엔코더의 출력신호를 사용하여 간단한 회로에 의해 상스위치 온, 오프 제어방식을 제안하였다. 제안된 상스위치 제어방식에서 스위치 온, 오프각 제어정도는 기존의 일반적인 상스위치 제어방식과 달리 마이크로프로세서의 샘플링주기 및 SRM의 운전속도와 관계없이 항상 원하는 위치에서 ON·OFF스위칭을 행할 수 있다. 또한 엔코더 및 제어기를 저가격화와 더불어 구동시스템의 안정화를 구현함으로써 SRM의 실용화 가능성이 실험을 통해 입증되었다.

[참 고 문 헌]

- [1] B. K. Bose, T. J. E. Miller, P. M. Szezesny and W. H. Bocknell, "Microcomputer Control of Switched Reluctance Motor", *IEEE Trans. on Industrial Application*, vol. 22, no. 4, pp. 708-715, 1986.
- [2] D. W. J. Puller "New data base for switched reluctance drive simulation." *Proc. IEE*, Vol.138, Pt-B, No.6, pp.331-336, 1991.
- [3] Paul P.Acarney, Rolaud J.Hill and Clive W.Hooper: "Detection of Rotor Position in Stepping and Switched Motors by Monitoring of Current Waveforms", *IEEE Trans. on IE*, Vol.32, No.3, pp.215-222, 1985.
- [4] S. Vukosavic and V. R. Stefanovic, "SRM Inverter Topologies: A Comparative Evaluation", *IEEE Trans. on IA*, Vol.27, No.6, pp. 1034-1047, 1991.
- [5] J. T. Bass, "Robust torque Control of Switched-Reluctance Motors without Shaft-Position Sensor", *IEEE Trans. on IE*, Vol.33, No.3, pp.212-216, 1986.
- [6] P. H. Chappell, W. F. Ray and R. J. Blake, "Microprocessor Control of a Variable Reluctance Motor", *Proc. IEE*, Vol.131, No.2, Part.B, pp.51-60, 1984.
- [7] B. K. Bose, T. J. E. Miller, P. M. Szezesny and W. H. Bocknell, "Microcomputer Control of Switched Reluctance Motor", *IEEE Trans. on IA*, Vol.22, No.4, pp.708-715, 1986.
- [8] M. Ehsani, I. Husain and A. B. Kulkarni, "Elimination of Discrete Position Sensor and Current Sensor in Switched Reluctance Motor Drives", *IEEE Trans. on IA*, Vol.28, No.1, pp.128-135, 1992.
- [9] I. E. Liang, Y. Liao, and T. A. Lipo, "A New Variable Reluctance Motor Utilizing An Auxiliary Commutation Winding," *IEEE Trans. on IA*, Vol.30, No.2, pp.423-432, 1992.
- [10] I. Husain and M. Ehsani, "Torque Ripple Minimization in Switched Reluctance Motor Drives by PWM Current Control", *IEEE Trans. on Power Electronics*, Vol.11, No.1, pp.91-98, 1996.
- [11] P. C. Kjaer, J. J. Gribble and T. J. E. Miller, "High-Grade Control of Switched Reluctance Machines", *Proc. of MS/IEEE*, San Diego, California, pp.92-100, 1996