

## 지능 제어기를 이용한 SRM 센서리스 속도제어에 관한 연구

최재동\* 김민태° 오성업° 황영성° 김영록° 성세진°  
 한국항공우주연구소\* 충남대학교°

### Sensorless speed control of a Switched Reluctance Motor using intelligent controller

J. D. Choi\*, M. T. Kim°, S. U. Oh°, Y. S. Whang°, Y. R. Kim°, S. J. Seong°  
 Korea Aerospace Reserch Institute, Chungnam National University

#### Abstract

This paper describes a new method for indirect sensing of the rotor position in switched reluctance motors using fuzzy logic algorithm.

Through a novel fuzzy algorithm, the complete SRM magnetizing characterization is first constructed, and then used to estimate the rotor position. And also, the optimized phase is selected by phase selector. To demonstrate the promise of this approach, the proposed rotor position estimation algorithm is simulated for variable speed range.

#### 1. 서론

SRM은 단순성, 저 비용, 고속 동작을 위한 능력 그리고 안전한 동작 등에 의해 오늘날 상당한 주목을 받고 있고 제조업, 전기 자동차, 경전철, 항공우주, 자동화 시스템 및 응용 분야와 같은 폭넓은 영역들을 포함할 수 있게 되었다. 이 중에서 SRM의 가장 주요한 장점은 그들의 단순성과 강인한 구조이다. 이것은 유도전동기나 동기 전동기보다 훨씬 제작하기가 쉽다. 실제적으로, 그들의 회전자는 권선과 영구자석이 전혀 없고, 고속, 고온, 위험한 동작조건들에 매우 적합한 특징을 갖고 있다. 전력전자 컨버터들과 결합하여, SRM의 내구성이 유도전동기보다 훨씬 좋다. 그럼에도 불구하고, SRM과 결합된 다양한 장점들이 상대적으로 값비싼 회전자 위치 검출기의 이용에 크게 의존하고 있다는 것이다<sup>[1]</sup>.

최근 SRM 회전자 위치 센서리스 제어를 얻기 위해 다양한 형태의 방법이 제안되었다<sup>[2-4]</sup>. 이러한 방식들은 여자되지 않은 권선에 혹은 부하가 걸려있는 권선에 임의로 전류를 삽입하여 그 응답을 얻거나 전류 파형들로부터, 특히 전류 상승과 하강 시간에 전류 크기와 회전자 위치의 함수로부터 추출되어진 권선 인덕턴스에 관한 정보를 이용하는 방식이다. 이 방식

들은 추가적인 하드웨어와 그들의 일부가 적절하게 단순화된 SRM 모델이 아닌 것에 기본을 두고 있다.

최근, 지능제어기(퍼지 혹은 신경회로망)를 기반으로 한 방식이 SRM의 회전자 위치 센서리스 제어를 위해 이용되어지고 있고 그 결과들이 제안되어지고 있다<sup>[5-7]</sup>. 상세한 자화특성과 함께, SRM의 회전자 위치 센서리스 제어가 가능하다. 이러한 센서리스 기술들은 회전자 위치 검출을 위하여 릴럭턴스 변화 그 자체를 사용할 수 있다. 쇄교자속이 상전압과 상전류 측정에 의해 얻을 수 있으며 자속과 전류의 관계로부터 회전자 위치 검출이 가능하다.

본 논문에서는 종래의 지식 기반 퍼지 제어기를 이용한 퍼지 자속 관측기가 SRM의 회전자 위치 센서리스 제어를 얻기 위해 제안되어졌다. 제안된 퍼지 자속 관측기는 회전자 위치, 전류와 자속의 관계에 의한 룰 베이스를 생성하였으며, 퍼지화와 비퍼지화를 통해 SRM의 자화특성 곡선을 생성하였다. 퍼지 자속 관측기로부터 생성된 SRM의 자화 특성곡선은 실제 상전압과 상전류로부터 측정된 데이터로부터 생성된 룰-업테이블(자화 특성 곡선)과 비교되어졌다. 또한 제안된 알고리즘을 이용한 계산된 각의 에러 오차가 분석되어졌으며, 시뮬레이션 결과 비교를 통해 제안된 알고리즘의 강인성을 입증하였다.

#### 2. 퍼지 논리 기반 자화모델 설정

SRM은 이중 돌극형 기기이다. 회전자에는 권선이 없고 영구자석이다. 그림1은 6고정자극, 4회전자극을 갖는 SRM의 단면도를 보여주고 있다. SRM은 여자된 고정자 극들에 일치하는 가장 가까운 회전자 극을 끌어 당김으로서 토크를 생성한다. 연속적인 토크 생성은 회전자 위치에 따라 고정자 상들을 순차적으로 여자 함으로서 발생되어진다. 순차적인 여자 때문에, 여기에 항상 최소 한상 이상이 도통되지 않는다. 또한 SRM은 공간적, 자기적 비선형성으로 특징지어진다. 그림2와 그림3은 수 많은 회전자 위치에서 6/4 SRM에 대한 쇄교자속대 전류곡선과 인덕턴스 프로파일을 각각 보여준다.

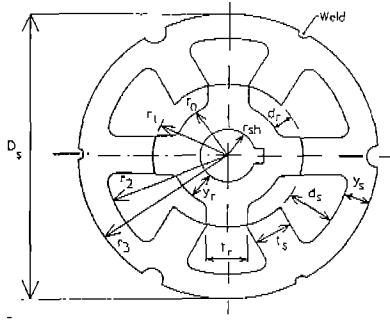


그림 1. 6/4 SRM 단면도

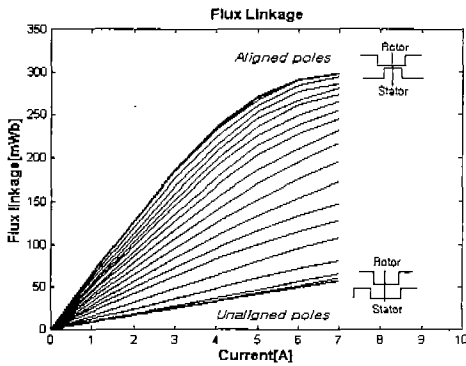


그림 2 측정된 자화 특성 곡선

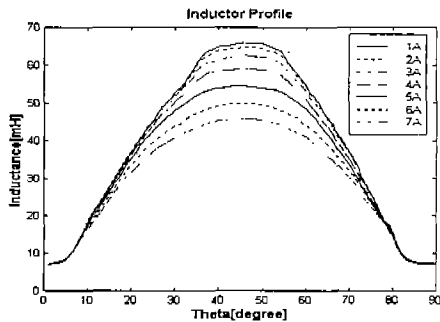


그림 3 측정된 인덕턴스 프로파일

비록 해석적으로 인덕턴스에 의해 SRM을 고려하는 것은 어려울지라도, 권선 쇠교 자속 특성을 그래프적으로 SRM을 설명하는 것은 상대적으로 쉬운 접근 방식이다. 예를 들면, 그림 2는 6/4극 SRM의 측정된 자화 곡선을 설명한다. 그 속에서 모든 요소들은, 회전자 위치들, 전류 레벨들, 포화 그리고 상호 커플링이 고려되어졌다. 이 설득력 있는 자화 모델이 측정결과로부터 최소 입력을 기반으로 제안된 퍼지 알고리즘에 의해 편리하게 설정되어질 수 있다.

퍼지 접근의 장점은 관련된 해석적 방정식 혹은 수학적 미분이 요구되지 않는다는 것이다. 대신, 모든 정보는 퍼지화, 퍼지 지식 기반, 그리고 비퍼지화에 관련되어 있다. 그림 4는 일반화된 퍼지 입력 멤버십 함수를 보여주고 있다. 그림에서, 전류는 포화레벨에 의해 일반화되어진다. 마찬가지로, 회전자 위치는 정

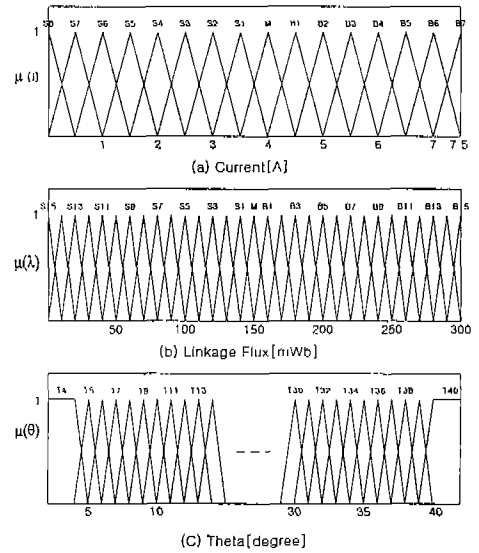


그림 4 입·출력 멤버십 함수들

렬 그리고 비정렬된 레벨에 의하여 일반화되어지고, 회전자 위치 기반은 8/6극 SRM에 대하여 30도의 기계적 각도를 갖고, 6/4극 SRM에 대하여 45도의 기계적 각도를 갖는다.

퍼지 영역을 결정하기 위해, 그림 4에서 보여지는 것처럼 입·출력 멤버십 함수가 각각 정의 되어졌다. 먼저  $\lambda$ 는 실제 측정된 자속 값을 기본으로 0에서 300mWb까지 10mWb의 단위로 31영역으로 할당되어졌고, 전류  $i$ 는 0에서 7.5A까지 0.5A의 단위로 16영역으로 나누어졌다. 그리고 회전자 위치각  $\theta$ 는 0에서 45도 까지 36영역으로 각각 선정되어 졌다. 다음 단계에서, 각 영역은 이때 퍼지 멤버십 함수로 할당되어 졌다. 본 논문에서, 전류와 자속에 관한 퍼지 셋들은 이등변 삼각형이 되도록 선정되어 졌으며 출력값으로 선정된 회전각은 5도이하와 40도이상에서 회전자 위치 검출 에러가 크게 발생하므로 사다리꼴 형태가 되도록 선정하였다. 모든 멤버십 함수들은 각 삼각형의 최대점이 퍼지영역의 중심점에 놓여지도록 선정되어졌고 1의 멤버십 값이 주어졌다. 다른 두절점은 두 개의 주변 퍼지 영역들의 중심에 놓이도록 선정되어 졌고 멤버십 값들은 이러한 두점에서 영으로 만들어졌다. 각 퍼지 셋은 표 1에 보여지는 것처럼 설정된 전류  $i$ 에 대해 S8로부터 B7, 자속  $\lambda$ 에 대해, S15로부터 B15, 회전자 각  $\theta$ 에 대해 T4로부터 T40까지 퍼지 언어항에 의해 표시되어 졌다.

입력과 출력 영역의 각각에서 퍼지 멤버십 함수가 정의된 후에, 측정된 학습 데이터는 퍼지 룰 베이스 모델을 창출하기 위하여 이용될 수 있다. 학습 동안, 각 입력-출력 데이터 쌍, 이것은 측정된 쇠교 자속, 전류, 각의 크리슝(crisp) 수 값으로 구성되어 있으며 시스템 모델인 퍼지룰들을 생성하기 위해 이용되어지고 있다. 각 입출력 데이터 쌍으로부터 퍼지룰을 결정하기 위해, 첫 번째 단계는 그들의 일치하는 퍼

지 영역의 모든 멤버쉽에 각 데이터 값(자속, 전류, 각)의 정도를 찾아내는 것이다. 변수는 이때 최대값을 갖는 영역에 할당되어진다. 각 새로운 물리 입-출력 데이터 쌍으로부터 발생되어질 때, 물 크기 혹은 진리표가 그 물에 할당되어진다. 여기서 이 물 정도는 예측 각에 대한 쇄교자속과 전류에 관련된 함수로 관련되어진다.

위의 결과로부터, 모든 학습 데이터 셋은 일치하는 퍼지룰들을 만들고 이것은 퍼지를 베이스에 저장된다. 그러므로, 각 입-출력 데이터 쌍으로부터 2차원 형태의 룩-업 테이블이 형성되어질 수 있다. 이때 전류와 쇄교 자속 퍼지 셋, 이것은 입력들이고 2차원 룩업 테이블의 축이고, 저장된 테이블 값들은 회전자 위치 출력 셋이다. 그림 5는 위와 같은 학습결과로부터 형성된 계산된 퍼지 자화특성 곡선이다.

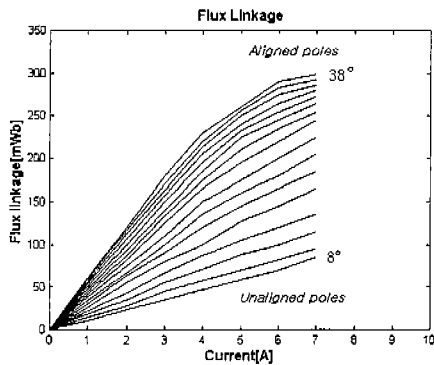


그림 5 퍼지 관측기에 의해 계산된 자화특성 곡선

### 3. 센서리스 제어 알고리즘

실제 SRM의 구동환경들은 전자기적 노이즈이다. 게다가, 누설 인덕턴스와 커플링 커패시턴스들은 측

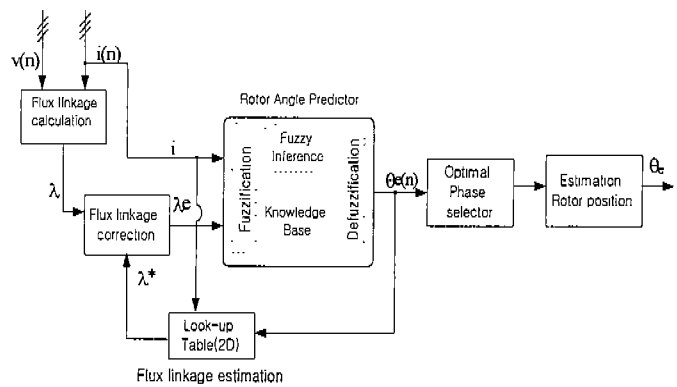


그림 6 제안된 퍼지 각 측정 알고리즘

정회로에 포함된 노이즈 전압을 만들 수 있다. SR 모터 구동에 있어 노이즈와 애러들에 강인성을 제공하기 위해 퍼지 로직 기반 예측기가 센서리스 방식의 성능을 강화시키기 위해 제안되어졌다. 제안된 알고리즘의 원리를 살펴보면 다음과 같다. 모터가 회전하는 동안, 3상들의 각각에 상전류들과 전압이 측정되어지고 쇄교자속은 모터 방정식(1)를 이용한 적분에 의해 계산되어진다.

$$\lambda(n) = \lambda(n) + \Delta\lambda \quad (1)$$

$$\lambda(0) = 0$$

여기서  $n$ 은 샘플링 수이다.

식(2)에 의해 계산된 쇄교자속,  $\lambda$ 와 전류,  $i$ 값은, 2절에서 생성된 퍼지논리 기반 자화곡선을 통해 유일하게 일치하는 회전자 위치를 찾을 수 있다. 초기 회전자 위치는 짧은 순간 전류펄스를 인가하여 절대 회전자 위치를 검출한다. 초기 예측된  $\theta_e(k-1)$ 는 회전자 위치를 결정하기 위한 초기 값으로 이용되어질 것이다. 이때 퍼지 각 예측 알고리즘을 통해 관측된 회전자 위치는 자속-각 룩업 테이블을 통해 쇄교자속  $\lambda^*(\theta_e(k-1), i)$ 를 생성한다.

표 1. 룩-업 테이블

	S15	S14	S13	S12	S11	S10	S9	S8	S7	S6	S5	S4	S3	S2	S1	M	B1	B2	B3	B4	B5	B6	B7	B8	B9	B10	B11	B12	B13	B14	B15
S7	T7	T13	T20	T30	T40	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
S6	T6	T10	T13	T18	T23	T30	T37	T40	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
S5	X	T7	T10	T13	T17	T20	T24	T26	T31	T37	T40	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
S4	X	T6	T8	T10	T13	T16	T18	T21	T23	T27	T30	T33	T37	T42	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
S3	X	X	T5	T8	T11	T13	T15	T17	T19	T21	T23	T25	T28	T31	T35	T38	T40	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
S2	X	X	X	T7	T9	T11	T13	T14	T16	T18	T20	T22	T23	T25	T28	T30	T33	T36	T38	T40	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
S1	X	X	X	T5	T9	T10	T12	T13	T14	T16	T17	T19	T21	T22	T24	T26	T28	T30	T32	T34	T37	T40	X	X	X	X	X	X	X	X	X
M	X	X	X	X	T8	T9	T11	T12	T13	T14	T16	T17	T18	T19	T21	T23	T24	T26	T27	T29	T31	T33	T36	T38	X	X	X	X	X	X	X
B1	X	X	X	X	T8	T9	T10	T11	T12	T13	T14	T16	T17	T18	T19	T21	T22	T23	T24	T26	T28	T29	T31	T33	T35	T40	X	X	X	X	X
B2	X	X	X	X	T5	T8	T9	T10	T11	T12	T13	T14	T15	T16	T17	T19	T20	T22	T23	T24	T25	T26	T28	T29	T32	T34	T37	T40	X	X	X
B3	X	X	X	X	X	T6	T8	T9	T10	T11	T12	T13	T14	T16	T17	T18	T19	T20	T21	T22	T23	T24	T26	T27	T29	T31	T33	T36	T40	X	X
B4	X	X	X	X	X	T5	T7	T8	T10	T11	T12	T13	T14	T15	T16	T17	T18	T19	T20	T21	T22	T23	T24	T25	T27	T29	T31	T33	T35	T38	X
B5	X	X	X	X	X	T6	T7	T8	T9	T10	T11	T12	T13	T14	T15	T16	T17	T18	T19	T20	T21	T22	T23	T24	T25	T27	T29	T31	T34	T36	X
B6	X	X	X	X	X	X	T4	T7	T8	T9	T10	T11	T12	T13	T14	T15	T16	T17	T18	T19	T20	T21	T22	T23	T25	T27	T29	T32	T35	T40	X

다음 레벨에서, 실제 쇄교자속  $\lambda$ 와 록-업 테이블을 이용해 얻어진 쇄교자속  $\lambda^*(\theta_b(k-1), i)$ 와 비교하여 수정된  $\lambda_e$ 값이 출력되어진다. 마지막으로 최적 상 선정기를 통해 최적의 상을 결정하게 된다. 이때 위치 계산은 그림 7에 보이는 것처럼 비정렬된 위치와 정렬된 위치에 가까운 영역에서  $[\frac{\partial \lambda}{\partial \theta}]_{i=\text{상}}$ 의 작은 변화율에 기인하여 정확성이 떨어진다. 따라서 본 연구에서는 모든 도통 상들 사이에 최적 상으로부터 위치를 계산하기 위해 각 상에서  $[\frac{\partial \lambda}{\partial \theta}]_{i=\text{상}}$ 가 최대가 되는 최적 영역( $8^\circ \sim 40^\circ$ )을 선정하여 최적 위치 평가기로 사용하였다.

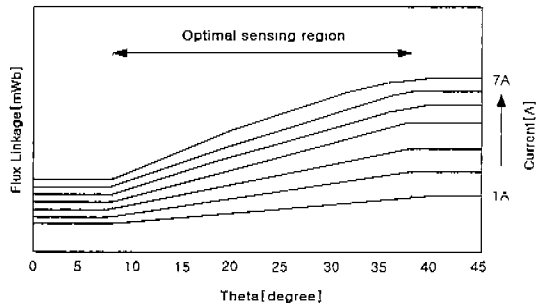


그림 7 회전자각에 따른 측정된 자화곡선들

제어기는 선정된 상으로부터 전압과 전류의 측정에 기반을 둔 퍼지 제어 알고리즘을 이용하여 정확하고 정밀한 회전자 위치를 찾기 위해 연속적으로 진행된다.

#### 4. 결과 고찰

본 연구에 사용된 모터는 6/4, 1Hp SRM이다. 시뮬레이션에 사용된 자화곡선은 퍼지 자속 각 예측기에 의해 모델링 되어졌다. 모든 각들과  $\Delta\theta$ 는 기계적인 각들이다. 비정렬된 그리고 정렬된 위치는 각각  $0^\circ$ 와  $45^\circ$ 이다. 모터는  $\theta_{on}=11^\circ$ 와  $\theta_{off}=34^\circ$ 를 갖는 750rpm과 1250rpm, 1.5A에서 각각 동작되어진다. PI 제어기를 이용한 단일 펄스 모드에서 정상 상태 속도에 대하여 실행되어졌다. 따라서 단일 펄스 모드에서, 전류 파형은 모터가 750rpm 및 1250rpm의 안정상태에 도달할 때 일정값을 갖게 되고 자속은 간단한 프로파일을 갖고, 삼각파 모양의 파형을 갖는다. 정상 상태에서 전류는 감소된 가속 토크에 기인하여 보다 낮게 된다. 그림 8과 그림 9는 전류, 자속, 계산된 각, 실제 각 그리고 계산된 각과 실제 각사이의 오차들이 보여지고 있다. 계산된 각 오차는 지정된 샘플링 주파수 10KHz에 기인하여 750[rpm]에서 최대  $\pm 0.9^\circ$ 를 가지며, 1250[rpm]에서는 최대  $\pm 1.2^\circ$ 의 오차각을 갖는다. 각 상의 정렬된 위치에 가까울수록  $[\frac{\partial \lambda}{\partial \theta}]_{i=\text{상}}$ 의 값이 작아져 점차 오차가 커지게 된다.

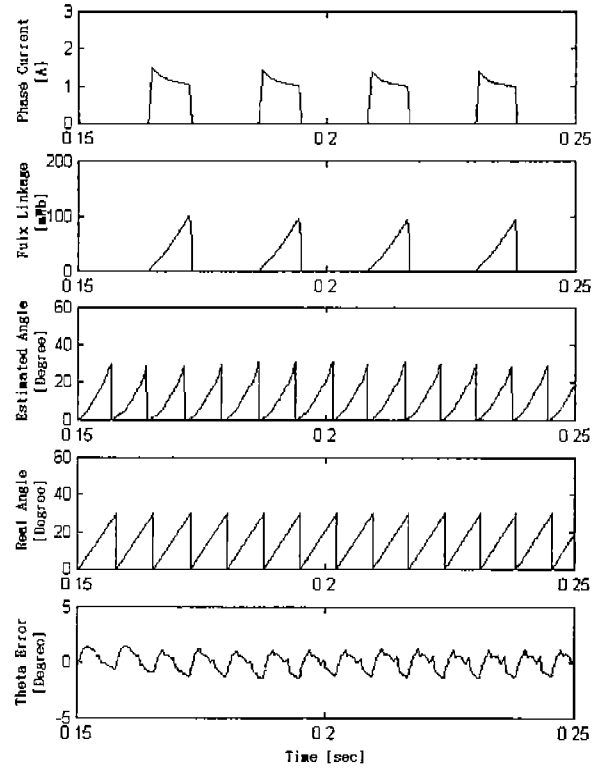


그림 8. 전류, 자속, 계산된 각, 실측된 각, 오차각 ( $\theta_{on} = 11^\circ$ ,  $\theta_{off} = 34^\circ$ , 750[rpm])

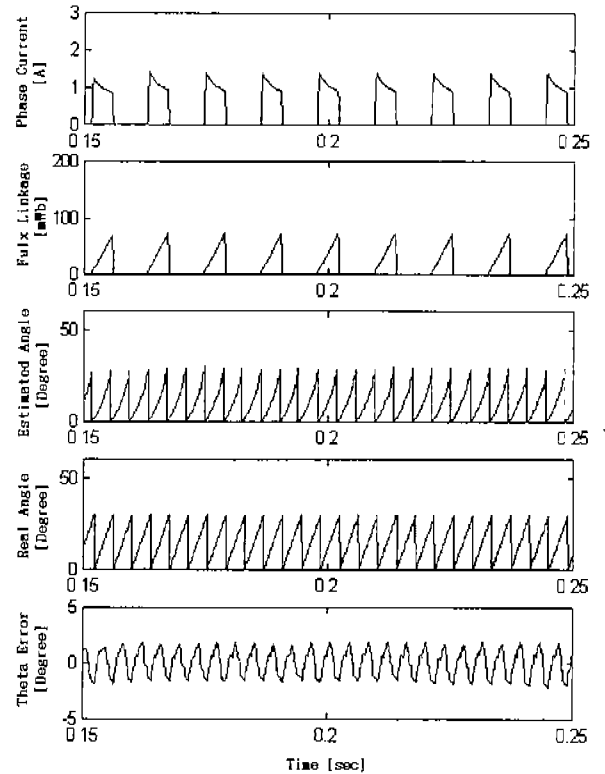


그림 9. 전류, 자속, 계산된 각, 실측된 각, 오차각 ( $\theta_{on} = 11^\circ$ ,  $\theta_{off} = 34^\circ$ , 1250[rpm])

## 5. 결론

퍼지논리 기반 자화 모델과 회전자 위치 센서리스 제어기가 본 논문에서 제안되어 졌다. 제안된 퍼지논리 기반 자화 모델은 실제 측정된 자화 곡선과 거의 일치하는 결과를 보여주고 있다.

상 선정을 위해 자속 변화가 최대가 되는 각 상의 최적 영역을 선정하여 위치 평가기에 사용되었다. 제안된 알고리즘을 이용한 예측 각의 에러 오차 결과 제시되어 졌으며, 결과 비교를 통해 제안된 퍼지 위치평가기 알고리즘의 강인성을 입증하였다.

## 참 고 문 헌

- [1] Longya Xu, Jianrong Bu, "Position Transducer Control of a Switched Reluctance Motor Using Minimum Magnetizing Input", Proc. IEEE IAS'97, pp. 533-539, 1997.
- [2] P.P. Acarnley, R.J. Hill, and C.W. Hooper, "Detection of rotor position in stepping and switched reluctance motor by monitoring of current waveforms", IEEE Transaction IE, Vol. 32, pp. 215-222, 1985.
- [3] M. Ehsani, I. Husain, and A.B. Kulkarni, "Elimination of discrete position sensor and current sensor in switched reluctance motor drives", IEEE Transaction IA, Vol 28, pp. 128-135, 1992.
- [4] G. Gallegos-Lopez, P.C Kjaer, and T.J. E. Miller, "A new sensorless method for switched reluctance motor drives", Proc. IEEE IAS'97, pp. 564-570, 1997.
- [5] Nesimi Ertugrul and Adrian Cheok, "Indirect Angle Estimation in Switched Reluctance Motor Drives using Fuzzy Logic Based Predictor/Corrector", IEEE Power Electronics Specialist Conference, pp845-851, 1998
- [6] Erkan Mese, David A. Torrey, "Sensorless Position Estimation for Variable-Reluctance Machines using Artificial Neural Networks", IEEE, IAS'97, pp540-547, 1997
- [7] P.C. Kjaer, F. Blaaierg, J.K. Pedersen, P. Nielsen, and L.Andersen, "Position Sensorless Control of a SRM Drive Using ANN-Techniques", IAS, pp709-714, 1998