

## SRM구동을 위한 비간접 각 측정 방식

최재동\*, 김민태°, 황영성°, 성세진°, 전철환†  
 항공우주연구소\*, 충남대°, 군산대†

### Indirect angle test method for Switched Reluctance Motor drive

J.D. Choi\*, M.T. Kim°, Y.S. Hwang°, S.J. Seong°, C.H. Jeon†  
 Korea Aerospace Reserch Institute\*, Chung National University°, Kunsan National University†

**Abstract** - This paper introduces a new rotor position estimation algorithm for the SRM, based on the magnetizing curves only at aligned and unaligned rotor positions. Through basic test method, the complete SRM magenetizing 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. 서 론

스위치드 릴럭턴스 모터(SRM)의 단순성과 저렴한 가격은 최근 많은 산업 응용에 주목을 받아왔다. 이들의 간단한 구조는 SRM 구동이 영구 자석 브러시리스 DC 모터와 유도 전동기 구동에 경쟁할 만한 선택을 만들었다. 폭 넓은 속도 범위에 걸친 높은 효율의 SRM 시스템은 정확한 회전자 위치 검출의 사용을 통하여 도통 각들의 선정이 가능하다. SR 모터들의 회전자 정보에 대한 요구는 종래의 회전자 위치 센서들의 일부 형태의 사용에 의해 만족되어 졌다. 흔히, 축에 부착된 엔코더, 레졸버 혹은 홀 센서가 회전자 위치를 공급하기 위해 이용되어진다. 어쩌든 이러한 값비싼 센서들의 사용은 모터 그 자체보다도 열악한 환경에서 훨씬 더 적은 내구성을 갖게 될 것이다. 따라서 그들은 신뢰도 문제를 불러일으키게 될 것이고, 구동의 응용범위에 제약을 노출하게 된다.

최근 직접 회전자 위치 검출기를 제거하기 위한 폭넓은 연구활동이 진행되어 지고 있으며, 회전자 위치의 비간접 결정에 의해 단순화되어 졌다. 초평전류 방식<sup>(1)</sup>, 자속-전류 방식<sup>(2)</sup>, 임피던스 측정<sup>(1)(3)</sup>, 모델레이션 방식<sup>(4)</sup>, 전류 기울기 방식<sup>(5)(6)</sup>, 그리고 전류 수정 모델을 이용한 순간 회전자 위치 평가에 대한 방식<sup>(7)(8)</sup>이 비간접 회전자 위치 검출을 위해 연구되어졌다. 기본적인 원리는 SRM의 자기적 특성들에 모두 기반을 두고 있다. 이러한 비간접 방식의 기대되는 이득은 다음과 같다: 센서들의 전기적 접촉의 제거, 줄어든 크기, 유지 보수가 없고, 외부 요소에 영향받지 않으며, 증가된 신뢰도, 그리고 폭넓은 속도 영역을 갖는다는 점이다. 따라서 비간접 방식을 이용한 회전자 위치의 정확한 지식은 SRM 구동의 좋은 성능을 위해 요구되어지고 있다.

본 논문은 SRM 구동을 위해 높은 정밀도를 갖는 비간접 위치 평가 알고리즘이 제시되었다. 쇄교자속 모델을 이용한 회전자 위치 검출 방식의 간단한 검토가 이루어 졌으며 회전자 위치 검출을 위한 최적의 상을 선정하기 위한 방법이 제시되었다. 이때 제안된 알고리즘의

원리가 쇄교자속( $\lambda$ ), 전류( $i$ ), 와 위치( $\theta$ )의 관계로서 설명되어졌다. 제안된 방식의 비간접 위치 평가 알고리즘의 오차 분석결과가 직접회전자 위치 검출기로부터 측정된 결과와 비간접 위치 검출기로부터 측정된 결과와 비교 검토되었다.

### 2. 쇄교자속 모델

그림 1에서 보여지는 것처럼, 전형적인 SRM 자속측정을 위한 시스템이 SRM, 전력 컨버터 그리고 전압, 전류 검출회로 및 DSP제어보드로 구성되어 있다. 제어 루프에서 요구되는 궤환 신호들은 상전압과 상 전류들이다.

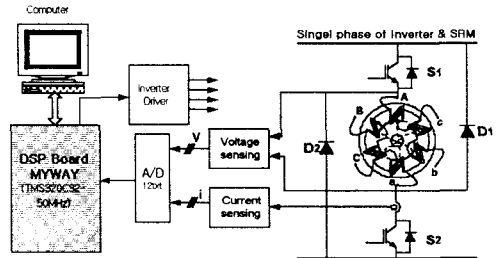


그림 1 자속 측정을 위한 시험 회로

필수적으로, SRM은 그들의 토크 방정식에 의해 모델되어질 수 있다. 이것은 쇄교자속과 함께 상전류의 관계에 기본을 둔 전자기적 기기로서 SRM을 설명한다.

$$T_e = \frac{1}{2} [i] \frac{d[\lambda]}{d\theta} \quad (1)$$

$$\text{혹은, } T_e = \frac{1}{2} [i] \frac{d[L]}{d\theta} [i]^T \quad (2)$$

여기서, 6/4 극 SRM의 경우에,  $[i] = [i_a, i_b, i_c]$ ,  $[\lambda] = [\lambda_a, \lambda_b, \lambda_c]$  그리고

$$[L] = \begin{bmatrix} L_{aa} & L_{ab} & L_{ac} \\ L_{ba} & L_{bb} & L_{bc} \\ L_{ca} & L_{cb} & L_{cc} \end{bmatrix}$$

방정식 (1), (2)를 살펴보면, 상태변수로서 쇄교자속을 취하는 것은 권선 인덕턴스를 이용하는 것보다 SRM 모델링에 있어 좋은 접근방식이라 할 수 있다. 왜냐하면 변수의 수가 9개로부터 3개로 상당히 줄어들 뿐만 아니라 8/6모터의 경우 16개에서 4개로 보다 많은 변수가 줄어들게 된다. 또한 권선 인덕턴스에 의한 SRM모델링은 높은 비선형성을 갖는 수 많은 권선인덕턴스 수가 요구되며, 상호 인덕턴스가 요구되어지고, 쇄교자속에 대한 계산 혹은 측정이 인덕턴스에 대한 것보다도 더욱 직접적이고 간단하다. 상세한 SRM 자화 특성들을 얻기 위한 기본적인 방식은 유한요소 해석 혹은 실험 테스트에

의한다. 유한요소 해석은 다양한 해가 많은 회전자 위치와 전류레벨에서 요구되는 어려움이 있어 직류 전원에 의해 여자된 비선형 직렬 R-L회로의 단자 방정식을 이용한 실험방식이 본 연구에서 사용되었다. 단자 방정식은 다음과 같이 주어진다.

$$V = Ri + \frac{d\lambda}{dt} \quad (3)$$

여기서  $V$ 는 인가된 직류전압이고,  $i$ 는 권선에 흐르는 전류, 그리고  $\lambda$ 는 쇄교자속이다. 방정식 (3)로부터, 쇄교자속은 다음과 같다.

$$\lambda = \int_0^t (V - Ri) dt \quad (4)$$

여기서,  $I$ 는 정상상태 전류, 전류( $i$ )와 전압( $V$ )의 과도상태는 마이크로 프로세서에 기록되고 데이터는 PC로 전송되어진다. 얻어진 데이터는 식(4)를 이용하여 쇄교자속을 얻기 위해 계산되어진다. 그림 1의 전압-전류( $v-i$ ) 측정회로에 의해 그 특성들이  $\Delta\theta=2^\circ$ 에 대해 비정렬된 위치로부터 정렬된 회전자 위치까지  $\theta$ 에 대하여 측정되어졌다. 인덕턴스를 결정하기 위한 자속-전류( $\lambda-i$ ) 특성들이 실험에 의해 얻어졌다. 특정한 회전자 위치  $\theta$ 에 대한  $\lambda-i$  곡선의 실험적인 데이터들은  $\lambda = f(i)$ 에 의해 전류( $i$ )의 함수로서 자속( $\lambda$ )을 얻기 위해 이용되어졌다. 이 함수의 미분은 요구되는 전류와 회전자 위치  $\theta$ 에 대한 인덕턴스의 값을 준다.

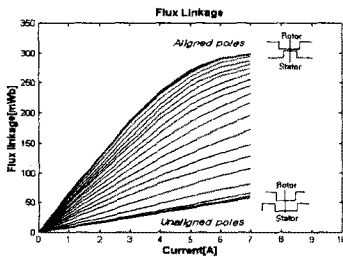


그림 2 자속-전류 측정 곡선

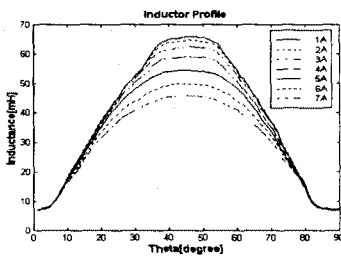


그림 3 측정된 인덕터 프로파일

### 3. 회전자 위치평가 알고리즘

제어하고자 하는 특정한 SRM의 전체 자화곡선을 안다면, 레한신호로서 측정된 전류, " $i$ "와 쇄교자속, " $\lambda$ "를 사용하여 유일하게 일치하는 회전자 위치를 찾을 수 있다. 이 절에서, 제안된 알고리즘 원리가  $\lambda$ ,  $i$ , 그리고  $\theta$ 의 함수로서 설명되어졌다. 일반적인 흐름 다이어그램이 그림 3에 보여지고 있다. 위치 수정은 최종 평가되는 위치  $\theta_e$ 를 얻기 위하여 초기 예측되는 위치  $\theta_p$ 를 수정

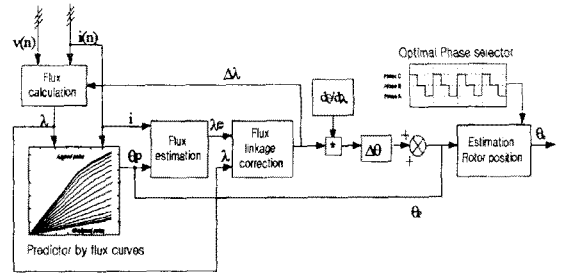


그림 4 자속-전류에 의한 각 측정 알고리즘

한다. 각상에 쇄교자속, 전류와 위치가 다음처럼 표현되어진다.

$$\lambda = \lambda(i, \theta) \quad (5)$$

$$i = i(\lambda, \theta) \quad (6)$$

$$\theta = \theta(i, \lambda) \quad (7)$$

그러므로,  $\lambda$ ,  $i$  그리고  $\theta$ 에 대한 미세 변화는 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\Delta\lambda = \left[ \frac{\partial\lambda}{\partial i} \right]_{\theta=\text{일정}} \cdot \Delta i + \left[ \frac{\partial\lambda}{\partial\theta} \right]_{i=\text{일정}} \cdot \Delta\theta \quad (8)$$

$$\lambda = \lambda_e + \Delta\lambda \quad (9)$$

$$\Delta\theta = \left[ \frac{\partial\theta}{\partial i} \right]_{\lambda=\text{일정}} \cdot \Delta i + \left[ \frac{\partial\theta}{\partial\lambda} \right]_{i=\text{일정}} \cdot \Delta\lambda \quad (10)$$

$$\theta_e = \theta_p + \Delta\theta \quad (11)$$

식(11)에서  $\theta_e$ 는 이전과 실제 위치값들을 이용함으로써 선형적으로 연결되어 질 수 있다. 각 상에 대한 쇄교자속은 식(4)로부터 계산되어질 수 있다. 실시간에서 전류는 상 전압의 적분에 의해 예측되는 쇄교자속 보다도 훨씬 적은 오차들을 갖기 쉽다. 그러므로,  $\Delta i=0$ 을 가정한 모델이 가장 오차가 적다. 식(8)에서 전류( $\Delta i=0$ )에서 오차가 없다고 가정한다면,  $\Delta i=0$ 의 조건으로부터 식(12)을 얻을 수 있다.

$$\Delta\theta = \left[ \frac{\partial\theta}{\partial\lambda} \right]_{i=\text{일정}} \cdot \Delta\lambda \quad (12)$$

다음 레벨에서,  $\Delta\lambda$ 를 생성하기 위해 실제 쇄교자속  $\lambda$ 를 가지고 계산된 쇄교자속  $\lambda_e(\theta_p, i)$ 를 비교한 후  $\Delta\theta$ 를 생성하기 위해  $\theta_p$ 를 수정한다. 요구되는 정확도에 의존하여, 각 수정이 쇄교자속 오차,  $\Delta\lambda$ 가 거의 무시할 정도가 될 때까지 그 자체를 여러번 반복한다. 마지막으로 최종 각 값  $\theta_e(n)$ 을 결정하기 위해, 선정된 상 각은 최적 상 선정기로부터 발견된 그들의 각각의 신뢰값에 의해 곱하여진다. 그리고 전체는 모든 신뢰값 성분들을 부가함으로써 나누어진다.

$$\theta_e = \frac{\theta_1 \cdot C_1 + \theta_2 \cdot C_2 + \theta_3 \cdot C_3}{C_1 + C_2 + C_3} \quad (13)$$

여기서,  $\theta_e$ 는 최종 결정된 측정각이고,  $\theta_1$ 과  $\theta_2$ 는 각각 상 1, 상 2 그리고, 상3의 상각 측정이고,  $C_1$ ,  $C_2$  그리고  $C_3$ 는 상1, 상2 그리고 상 3의 신뢰값들이다. 위치 계산은  $\left[ \frac{\partial\lambda}{\partial\theta} \right]_{i=\text{일정}}$ 의 작은 변화율에 기인하여 비정렬된( $\theta_p$ )위치와 정렬된( $\theta_e$ ) 위치에 가까운 영역에서 정확성이 떨어진다. 따라서 본 연구에서는 모든 도통 상들 사이에 최적 상으로부터 위치를 계산하기 위해 각 상에서  $\left[ \frac{\partial\lambda}{\partial\theta} \right]_{i=\text{일정}}$ 가 최대가 되는 영역을 선정하여 오차  $\Delta\theta$

를 최소화하여 최적 위치 평가기로 이용되어졌다.

#### 4. 시뮬레이션 결과 검토

본 연구에 사용된 모터는 6/4, 1Hp SRM이다. 시뮬레이션에 사용된 자속-전류 곡선은 2절에서 측정된 데이터를 이용하여 회전자 위치 알고리즘의 룩-업 테이블로 사용되어졌다. 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 500rpm과 1000rpm, 2A에서 각각 동작되어진다. 그림 5 와 그림 6의 시뮬레이션 결과 계산된 전류, 자속, 선정된 최적의 상, 측정각 오차 그리고 계산된 각들이 보여지고 있다. 결과들은 500rpm과 1000rpm의 정상 상태 속도를 갖는 모터의 단일 펄스 모드에 대해 실행되어졌다. 따라서 단일 펄스 모드에서, 전류 파형은 모터가 500rpm 및 1000rpm의 안정상태에 도달할 때 일정값을 갖게 되고 자속은 간단한 프로파일을 갖고, 삼각파 모양의 파형을 갖는다. 정상상태에서 전류는 감소된 가속 토크에 기인하여 보다 낮게 된다. 최적상 선정기는 각상에서  $[\frac{\partial \lambda}{\partial \theta}]_{i=\text{opt}}$ 가 최대가 되는 영역을 선정하여 A상-C상-B상이 차례로 선정되어 최적의 회전자 위치 정보를 제공하게 된다. 계산된 각 오차는 지정된 샘플링 주파수 10KHz에 기인하여 500[rpm]에서 최대  $\pm 1^\circ$ 를 가지며, 1000[rpm]에서는 최대  $\pm 1.8^\circ$ 의 오차각을 갖는다. 각 상의 정렬된 위치에 가까울수록  $[\frac{\partial \lambda}{\partial \theta}]_{i=\text{opt}}$ 의 값이 작아져 점차 오차가 커지게 된다.

#### 5. 결 론

상전압과 전류 측정을 통해 정렬된 그리고 비정렬된 자화 특성을 이용한 한 회전자 위치 검출 기술이 설명되어졌다. 측정된 자화 특성 곡선을 기반으로 SRM에 대한 비간접 회전자 위치 평가 알고리즘이 제안 되어졌다. 지정된 샘플링 주파수에서 오차 각의 분석 결과를 통해 제안된 회전자 위치 평가 알고리즘을 이용한 위치평가기의 만족할 만한 결과를 예측할 수 있었다.

#### (참 고 문 헌)

- [1] 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.
- [2] J.P.Lyons, S.R.MacMinn, and M.A.Preston, "Flux/current methods for srm rotor position estimation", Proc. IEEE IAS'91, pp. 482-487, 1991.
- [3] S.R. MacMinn, W.J. Rzesos, P.M. Szczensny, and T.M. Jahns, "Application of sensor integration techniques to switched reluctance motor drives", Proc. IEEE IAS'88, pp. 584-588, 1988
- [4] 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.
- [5] P.C. Kjaer, F. Blaajerg, J.K. Pedersen, P. Nielsen, and L. Andersen, "A new indirect rotor position sensor and current sensor in switched reluctance motor drives", Proc. ICEM'94, pp. 555-560, 1994.
- [6] 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.
- [7] N. Ertugal and P.P. Acarnley, "A new algorithm for sensorless operation of permanent magnet motors", IEEE Transaction IA, Vol. 30, pp. 126-133, 1994.

- [8] G. Gallegos-Lopez, Philip C. Kjaer, T.J.E. Miller, "High-grade Position Estimation for SRM Drives Using Flux linkage/Current Correction Model", Proc. IEEE IAS'98, pp731-738, 1998

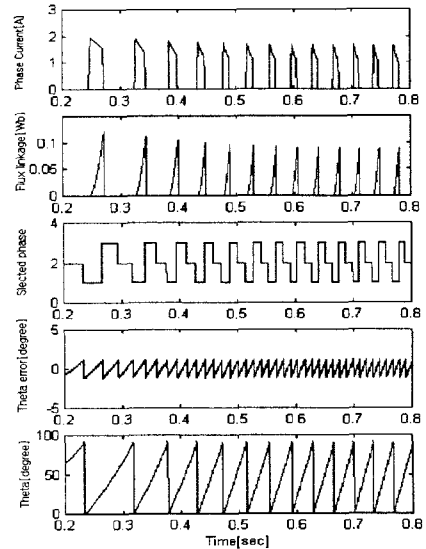


그림 5 계산된 전류, 자속, 선정각, 오차 각, 계산된 각

( $\theta_{on}=11^\circ$ ,  $\theta_{off}=34^\circ$ , 500[rpm])

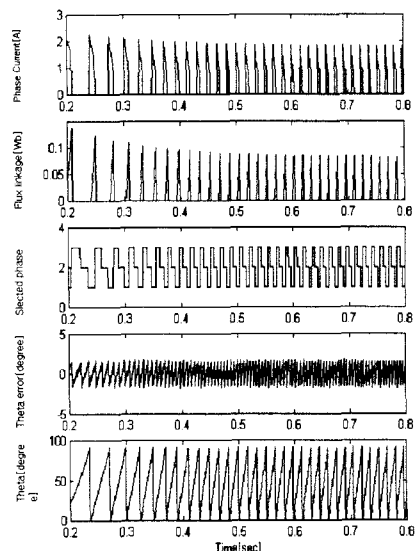


그림 6 계산된 전류, 자속, 선정각, 오차 각, 계산된 각

( $\theta_{on}=11^\circ$ ,  $\theta_{off}=34^\circ$ , 1000[rpm])