

SRM의 최적운전을 위한 순시토크 추정과 스위칭 각 제어

백원식*, 김민회**, 김남훈**, 최경호***, 김동희*

*영남대학교, **영남이공대학, ***경북전문대학,

Instantaneous Torque Estimation and Switching Angle Control for Optimal Operation of SRM

Won-Sik Baik*, Min-Huei Kim**, Nam-Hun Kim**, Kyeong-Ho Choi***, Dong-Hee Kim*

*Yeungnam University, **Yeungnam College of Sci. & Tech., ***Kyungbuk College

ABSTRACT

This paper presents a simple torque estimation method and switching angle control of Switched Reluctance Motor (SRM) using Neural Network (NN). SRM has gaining much interest as industrial applications due to the simple structure and high efficiency. Adaptive switching angle control is essential for the optimal driving of SRM because of the driving characteristic varies with the load and speed. The proper switching angle which can increase the efficiency was investigated in this paper. NN was adapted to regulate the switching angle and nonlinear inductance modelling. Experimental result shows the validity of the switching angle controller.

1. 서론

최근 간단한 구조와 높은 효율등의 많은 장점들로 인해 관심이 고조되고 있는 스위치드 릴럭턴스 전동기 (Switched Reluctance Motor, SRM)는 부하토크와 회전 속도에 따라 운전 특성이 달라지므로, 가변구동에서의 전동기의 최적운전을 위해서는 부하토크와 회전속도에 따라 적절한 스위칭 각을 적용하여야 한다^{[1]-[5]}. 고정자 및 회전자 극호각, 토크 및 속도등의 여러 변수들로 인해 적정 스위칭 각을 선정하는데 있어서 어려움이 있기 때문에 본 논문에서는 실험을 통해 부하토크와 회전속도에 따라 효율이 가장 높은 적정 스위칭 각을 선정한 후 전동기 제어에 적용하는 방안에 대해 고찰하였다. 또한 제어에 필요한 비선형적인 함수를 구하고, 측정오차의 보정을 위해 신경회로망(Neural Network, NN)을 적용하였다. 스위칭 각 제어의 입력변수중의 하나인 순시토크의 추정에 있어서 인덕턴스의 비선형적인 특성의 고려를 위해 전류 크기에 따른 인덕턴스의 변화율을 신경회로망

을 통해 모델링하였으며, 순시토크 추정시에 적용되도록 하였다. 아울러 구현된 토크 추정기법과 스위칭 각 제어기의 적합성을 실험을 통해 검증하였다.

2. 스위칭 각의 선정

2.1 SRM의 스위칭 각

SRM은 회전자 위치각에 따른 인덕턴스의 변화율과 전류 제곱에 비례하는 토크를 발생한다. 연속적인 회전력을 얻기 위해서는 그림 1에 나타나 있는 것과 같이 인덕턴스가 증가하는 시점에서 전류가 나타나도록 컨버터 스위칭 소자를 제어하여야 하며, 부 토크로 인한 효율 저하를 억제하기 위해서는 적절한 스위칭 시간의 조정이 중요하다^{[1][2]}. 스위칭 각은 턴온과 턴오프 이후의 전류 증가나 소멸의 지연특성으로 인해 일반적으로 인덕턴스가 증가하기 이전에 턴온 각이 적용되고 정렬시점이전에서 턴오프 각이 적용된다. 이러한 스위칭 각은 고정자 권선 인덕턴스의 전압 방정식으로부터 전류 증가에 필요한 시간을 추정하여 턴온 각을 결정하고, 스트로크 동안 전동기에 공급된 평균입력전압과 컨버터 전원전압과의 관계로부터 턴오프 각을 추정하는 기법등이 제안되고 있다^{[2]-[4]}. 그러나 SRM에서는 스위칭 각에 따라 전류에 대한 발생 토크의 비율인 토크 정수가 달라지고, 고정자나 회전자 극호각, 역기전력 등의 여러 변수들로 인해 가변 부하 및 가변 속도에 따라 적정 스위칭 각을 선정하는데 어려움이 있다.

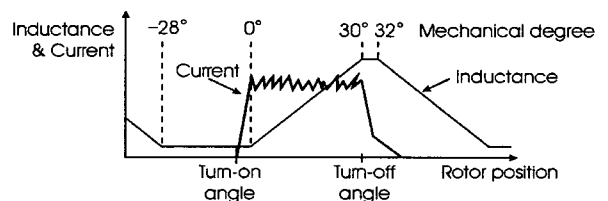


그림 1 3상 6/4극 SRM의 스위칭 각
Fig. 1 Switching angle of 3-phase SRM with 6/4 stator/rotor poles

2.2 효율 측정을 통한 적정 스위칭 각의 선정

전류에 대한 역기전력의 영향이 크지 않은 저속속도이하의 저속영역에서는 전류제어를 통해 전류의 크기를 조절하며, 전류제어의 대역과 제어주기가 적절히 설계되어 적용된 이후에는 스위칭 각의 제어를 통해 효율을 개선시킬 수 있다^[2]. 본 논문에서는 적정 스위칭 각의 선정을 위해 실험을 통해 스위칭 각에 따른 효율을 측정하였다.

측정시간은 초기 기동시를 제외한 30초 동안의 입력전력의 평균값을 취하였으며, 효율은 측정된 입력전력과, 속도 및 토크로부터 계산된 출력을 비교함으로써 추정되었다. 입력전력의 측정시 부하토크는 0.8[Nm]단위로 정격토크인 2.4[Nm]까지 측정되었고, 속도는 500[rpm]단위로 정격속도인 3000[rpm]까지 측정되었다. 그림 2와 3은 각각 0.8[Nm]인 경우의 500[rpm]과 3000[rpm]에서의 2도 단위의 스위칭 각에 따라 측정된 효율을 나타내고 있다. 동일한 운전 조건하에서 스위칭 각이 변함에 따라 측정된 효율이 다르게 나타나고 있음을 확인할 수 있다. 그림 4와 5는 각각 속도 및 토크에 따라 실험을 통해 효율이 가장 높은 스위칭 각으로 선정된 턴온 각과 턴오프 각을 나타내고 있으며, 그림 6은 선정된 스위칭 각을 적용한 경우에 측정된 전동기 효율을 나타내고 있다.

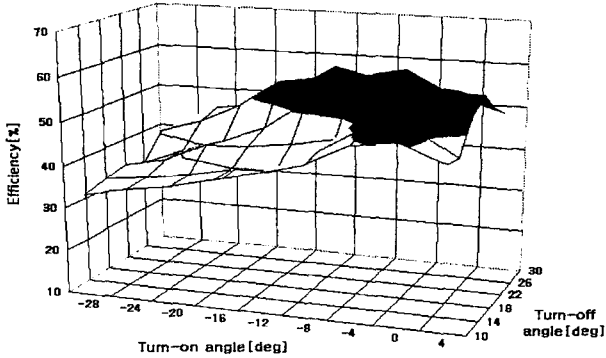


그림 2 스위칭 각에 따른 전동기 효율(500[rpm])
Fig. 2 Motor efficiency according to the switching angle(500[rpm])

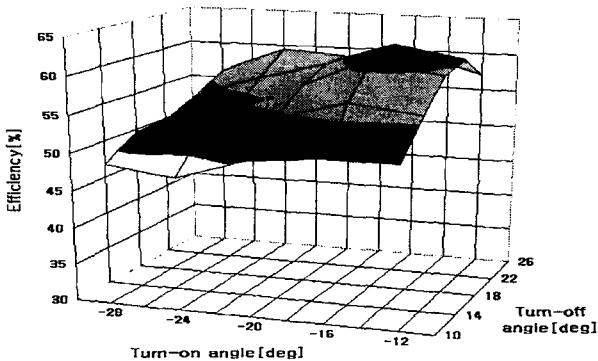


그림 3 스위칭 각에 따른 전동기 효율(3000[rpm])
Fig. 3 Motor efficiency according to the switching angle(3000[rpm])

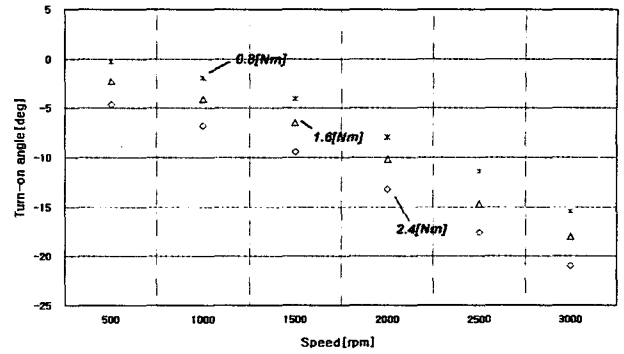


그림 4 효율 측정을 통해 선정된 턴온 각
Fig. 4 Determinated turn-on angle by efficiency measurement

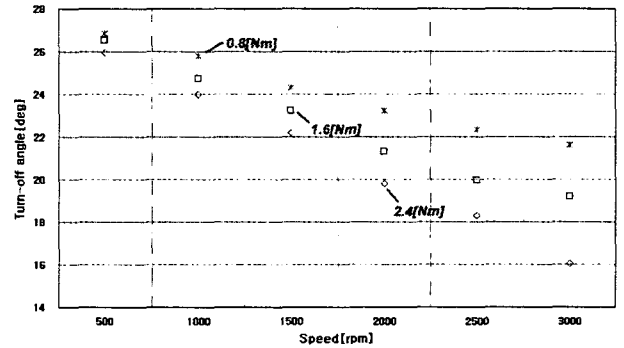


그림 5 효율 측정을 통해 선정된 턴오프 각
Fig. 5 Determinated turn-off angle by efficiency measurement

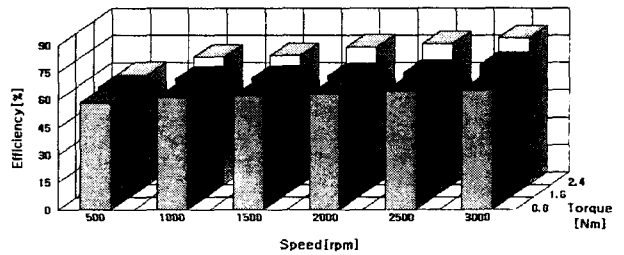


그림 6 토크 및 속도에 따라 측정된 전동기 효율
Fig. 6 Measured motor efficiency according to the torque and speed

3. 신경회로망을 이용한 스위칭 각 제어

3.1 스위칭 각 적용을 위한 신경회로망의 구현

500[rpm]과 0.8[Nm] 단위로 선정된 적정 스위칭 각은 속도 및 부하에 따라 변화율이 다르기 때문에 조건문을 써서 제어 프로그램에 직접 적용하기에는 어려움이 있다. 이러한 문제점은 알고리즘을 효율적으로 처리하기 위해 적용되는 룩업 테이블을 이용함으로써 해결될 수 있으며, 룩업 테이블의 구성을 위해서는 데이터 사이의

근사적인 함수가 필요하다. 이를위해 본 논문에서는 최근 비선형적인 제어에 많이 적용되는 신경회로망을 사용하였다^{[6][7]}. 신경회로망은 복잡한 문제에 대한 근사해를 비교적 신속히 찾아낼 수 있으며, 어떤 단편적인 정보로부터 연관된 전체적인 정보의 유추가 가능하다. 또한 연관장치의 고속화와 신경회로망을 위한 소프트웨어가 개발됨에 따라 시간이 많이 소요된다는 신경회로망의 단점이 보완되어 향후 전동기 제어를 비롯한 여러 분야에서의 적용이 기대된다^{[8][9]}.

신경회로망의 학습을 위해서는 Neuralworks사의 Professional II/plus Ver. 5.4 프로그램을 사용하였으며, 그림 7은 구현된 신경회로망의 구조를 나타내고 있다. 활성화 함수로는 학습을 위한 데이터의 비 선형성을 고려하여 시그모이드 함수(Sigmoid function)를 적용하였고 은닉층 뉴런의 수는 4개로 설정하였으며, 학습속도가 빠른 델타규칙(Delta rule)의 역전파 네트워크(Back-propagation Network)로 설계하였다^{[9][10]}. 그림 8은 실험을 통해 선정된 턴온 각과 학습된 신경회로망에 의한 턴온 각을 나타내고 있으며, 그림 9는 턴오프 각을 나타내고 있다. 학습된 신경회로망에 의한 스위칭 각이 기본 데이터를 추종하고 있음을 알 수 있다. 또한 그림 10과 11은 정격범위내에서의 전체 입력변수에 대한 신경회로망의 턴온 각과 턴오프 각을 각각 나타내고 있다.

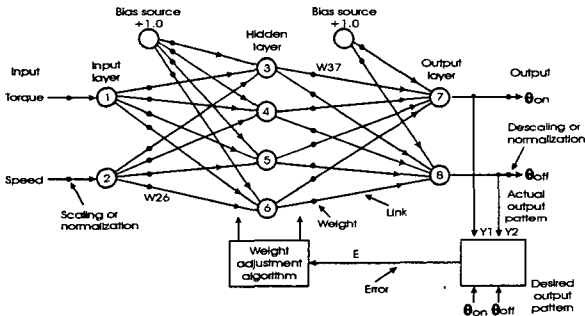


그림 7 스위칭 각을 위한 신경회로망의 구조
Fig. 7 Architecture of Neural Network for switching angle

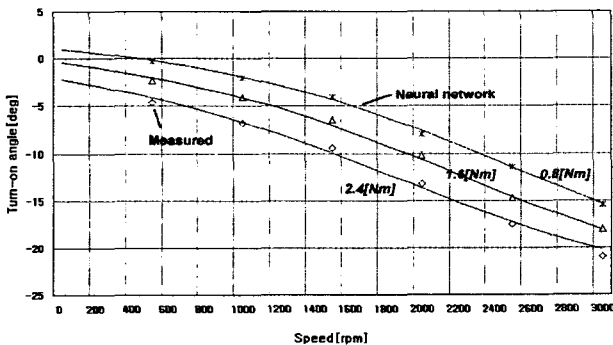


그림 8 측정과 신경회로망에 의한 턴온 각의 비교
Fig. 8 Comparison of the measured and the Neural Network turn-on angle

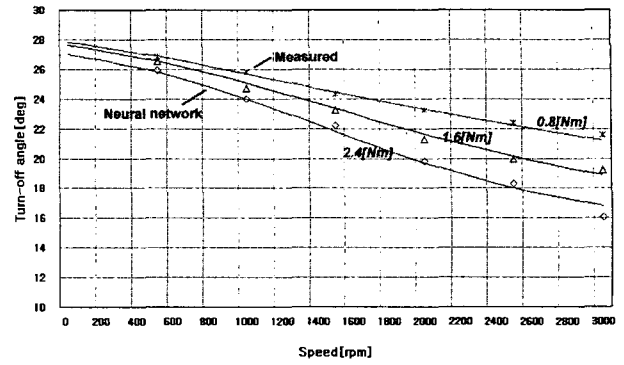


그림 9 측정과 신경회로망에 의한 턴오프 각의 비교
Fig. 9 Comparison of the measured and the Neural Network turn-off angle

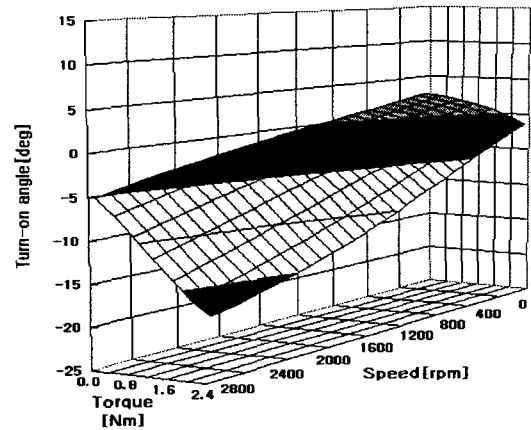


그림 10 학습된 신경회로망에 의한 턴온 각
Fig. 10 Turn-on angle by trained Neural Network

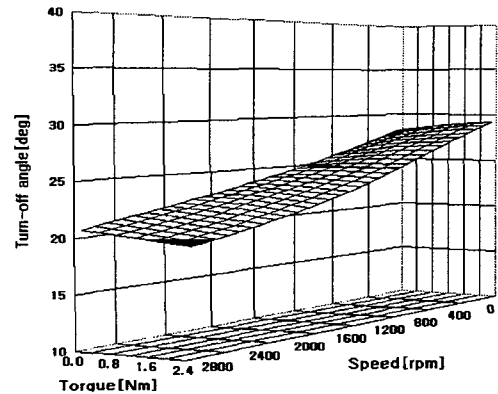


그림 11 학습된 신경회로망에 의한 턴오프 각
Fig. 11 Turn-off angle by trained Neural Network

3.2 스위칭 각 제어를 위한 순시토크의 추정

선정된 적정 스위칭 각은 회전속도와 부하토크에 따라 달라지므로 회전속도와 부하토크를 추정함으로써 적정 스위칭 각의 적용이 가능하게 된다. 전동기의 회전속도는 엔코더의 정밀도에 따라 정확한 값을 얻을 수 있으나, 일반적으로 부하토크의 순시값 검출에는 어려움이 있다. SRM에서의 순시토크는 전류와 회전자 위치각에

다른 인덕턴스의 변화량에 비례하므로 전류와 인덕턴스의 순시값을 정확히 검출할 경우 정확한 토크의 추정이 가능하게 되며, 전류는 전류센서를 통해 검출이 가능하다. 본 논문에서는 검출된 전류와 회전자 위치각에 따라 인덕턴스의 비선형적인 특성을 고려하여 순시토크의 크기를 추정하였다. 순시토크의 추정을 위해 실험을 통해 측정된 회전자 위치와 전류에 대한 인덕턴스의 변화율이 신경회로망을 통해 모델링 되었다.

4. 제어시스템 구성 및 실험 결과

구현된 스위칭 각 제어기의 적합성을 검증하기 위해 실험을 통해 속도응답특성을 확인하였으며, 적정 스위칭 각은 부하토크와 회전속도에 따라 매 스트로크마다 가변 되도록 하였다. 그림 12는 1800[rpm], 1[Nm]에서의 속도 응답파형과 추정된 토크파형을 나타내고 있으며, 그림 13은 3상의 고정자 권선에 흐르는 전류를 보여주고 있다. 또한 그림 14는 속도 및 추정된 토크에 따라 적용된 스위칭 각을 나타내고 있다. 과도상태에서는 속도 및 요구되는 토크에 따라 스위칭 각이 가변되고 있으며, 정상 상태에서는 최고 효율을 위한 스위칭 각이 일정하게 적용되고 있음을 알 수 있다. 그림 15는 속도지령이 ± 2000 [rpm]인 경우의 속도응답특성을 나타내고 있으며, 적정 스위칭 각의 제어를 통해 +2000[rpm]에서 -2000[rpm]의 속도지령을 0.15초 이내로 빠르게 추종하고 있음을 확인할 수 있다. 그림 16은 ± 2000 [rpm]에서의 스위칭 각의 변화를 나타내고 있으며, 속도 및 부하에 따라 적정 스위칭 각이 인가되고 있음을 확인할 수 있다. 또한, 그림 17은 500[rpm]→2500[rpm]의 속도지령에 대한 응답특성을 나타내고 있으며, 그림 18은 적용된 스위칭 각을 나타내고 있다.

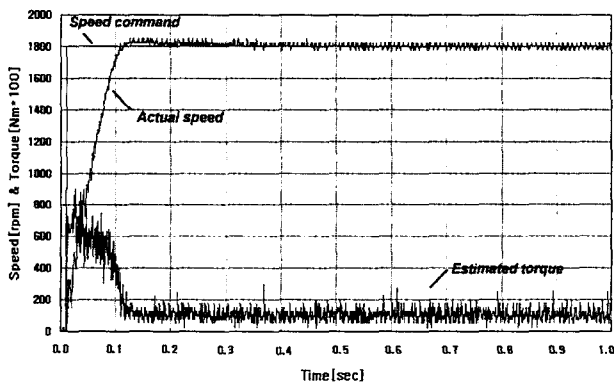


그림 12 1800[rpm], 1[Nm]에서의 속도 및 추정된 토크파형
Fig. 12 Speed and estimated torque waveforms at 1800 [rpm] and 1[Nm]

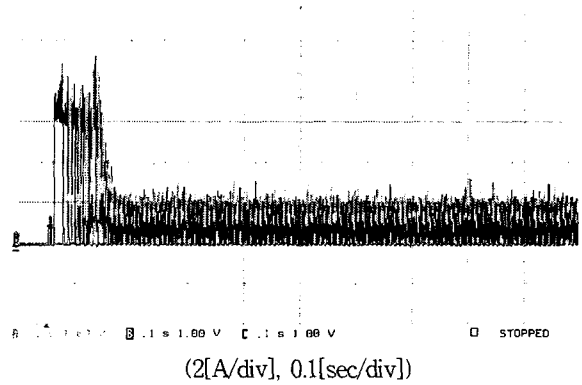


그림 13 1800[rpm], 1[Nm]에서의 3상 전류파형
Fig. 13 3-phase current waveforms at 1800[rpm] and 1[Nm]

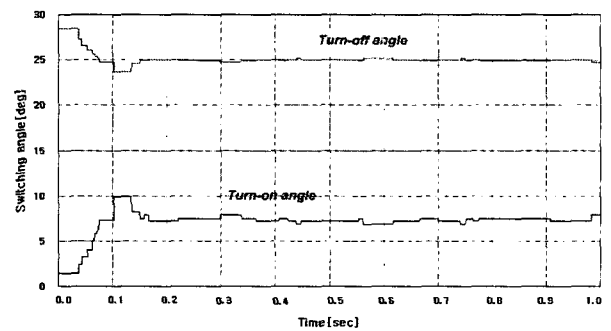


그림 14 1800[rpm], 1[Nm]에서의 스위칭 각의 변화
Fig. 14 Switching angle variation at 1800[rpm] and 1[Nm]

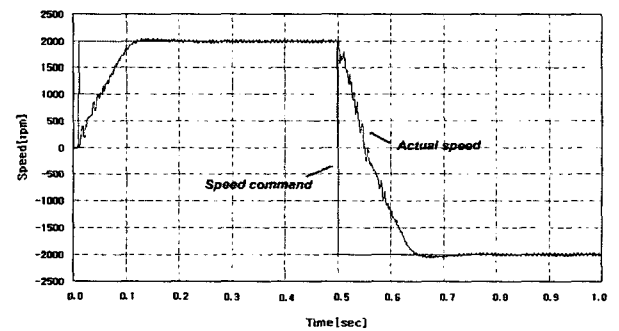


그림 15 ± 2000 [rpm], 1[Nm]에서의 속도응답 특성
Fig. 15 Speed response characteristic at ± 2000 [rpm] and 1[Nm]

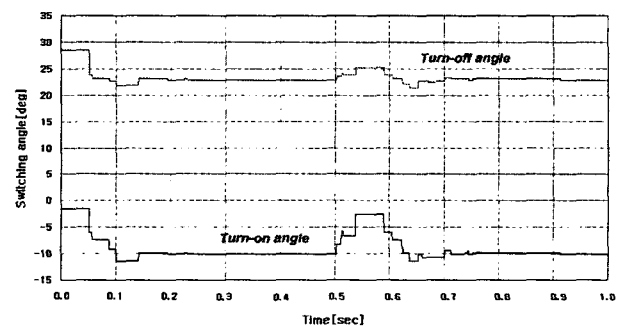


그림 16 ± 2000 [rpm], 1[Nm]에서의 스위칭 각의 변화
Fig. 16 Switching angle variation at ± 2000 [rpm] and 1[Nm]

참고 문헌

- [1] R. Krishnan, *Switched Reluctance Motor Drives*, CRC Press, 2001.
- [2] T.J.E. Miler, *Electronic Control of Switched Reluctance Machines*, Newnes Press, 2001.
- [3] B.K. Bose, T.J.E. Miller, Paul M. Szczesny, William H. Bicknell "Microcomputer Control of Switched Reluctance Motor", IEEE Trans. on I.A., Vol. IA-22, No. 4, pp. 708~715, July/Aug., 1986.
- [4] D.A. Torrey, J. H. Lang, "Optimal-efficiency excitation of variable-reluctance motor drives" IEE Proc-B, Vol. 138, pp. 1-14, Jan., 1991.
- [5] 최경호, 김남훈, 백원식, 김동희, 노채균, 김민희, 황돈하, "드릴용 SRM의 최적운전을 위한 스위칭각 산정", 대한전기학회 논문집, Vol. 50B, No. 11, pp. 575~582, Nov., 2001.
- [6] A.V. Rajarathnam, B. Fahimi, M. Ehsani, "Neural Network Based Self-Tuning Control of a Switched Reluctance Motor Drive to Maximum Torque per Ampere", Preceeding of IEEE Industrial Application Society Annual Meeting, pp. 548~555, Oct., 1997.
- [7] Khwaja M. Rahman, Suresh Gopalakrishnan, Babak Fahimi, Anandan Velayutham Rajarathnam, M. Ehsani, "Optimized Torque Control of Switched Reluctance Motor at All Operational Regimes Using Neural Network", IEEE Trans. on I.A., Vol. 37, No. 3, pp. 904~913, May/June, 2001.
- [8] 김대수, 신경망 이론과 응용(I)(II), 하이테크 정보, 1992.
- [9] *NeuralWorks Reference Guide*, Neuralworks, 2001.
- [10] B.K. Bose, *Modern Power Electronics and AC Drives*, PHPTR Press, 2001.
- [11] 최경호, 김동희, 노채균, 김민희, "스위치드 리럭턴스 전동기의 인덕턴스 산정에 관한 연구", 전력전자학회 논문집, 제 6권, 제 4호, pp. 333~340, Aug., 2001.
- [12] 백원식, 김남훈, 최경호, 김동희, 김민희, 황돈하, "디지털 히스테리시스 제어기를 이용한 SRM의 위치제어시스템", 전력전자학회 추계학술대회 논문집, pp. 41~45, Dec., 2001.
- [13] 김민희, 백원식, 김남훈, 최경호, 김동희, "디지털 히스테리시스 제어기를 이용한 SRM의 위치제어시스템", 전력전자학회 논문집, June, 2001.

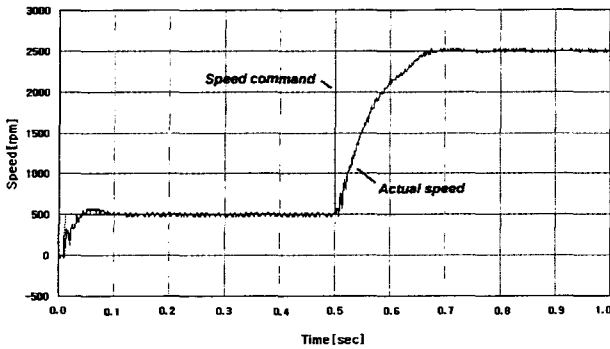


그림 17 500[rpm]→2500[rpm], 1[Nm]에서의 속도응답특성
Fig. 17 Speed response characteristic at 500[rpm]→2500[rpm] and 1[Nm]

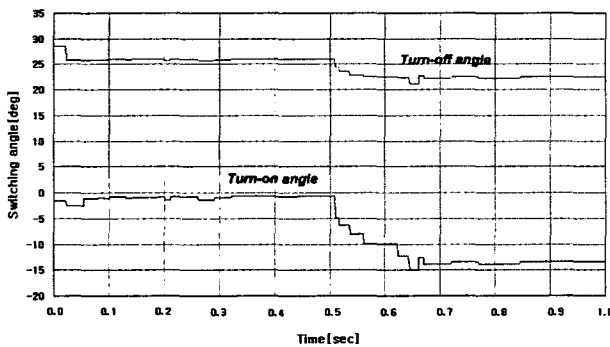


그림 18 500[rpm]→2500[rpm]에서의 스위칭 각의 변화
Fig. 18 Switching angle variation at 500[rpm]→2500[rpm] and 1[Nm]

5. 결론

본 논문에서는 간단한 구조와 높은 효율등의 많은 장점을 가지고 있는 SRM의 최적운전을 위한 스위칭 각 제어에 관해 연구하였다. 가변속 및 가변 부하로의 SRM의 적용시에 전동기의 최적 운전을 위해서는 스위칭 각 제어가 반드시 요구되므로 효율이 높은 적정 스위칭 각을 실험을 통해 선정된 후 전동기 제어에 적용하는 방안 에 관해 고찰하였다. 선정된 적정 스위칭 각을 실제 시스템에 적용하기 위한 비선형적인 함수를 구하고 측정오차의 보정을 위해 신경회로망을 적용하였으며, 순시토크 추정에 있어서도 신경회로망을 이용하여 인덕턴스의 비선형적인 특성이 고려되도록 하였다. 고효율 측면에서 선정된 스위칭 각 제어기의 동특성을 실제 제어시스템에 적용하여 응답특성을 확인하였으며, 이를 통해 구현된 스위칭 각 제어기의 적합성을 검증하였다.