

신경회로망을 이용한 SRM의 토크 추정과 스위칭 각 제어

白元植, 金玟會*, 金男堦, 崔景好, 金東熙

A Torque Estimation and Switching Angle Control of SRM
using Neural Network

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

요 약

본 논문에서는 신경회로망을 이용한 스위치드 릴럭턴스 전동기(Switched Reluctance Motor, SRM)의 간편한 순시토크 추정기법과 스위칭 각 제어에 대해 연구하였다. 간단한 구조와 높은 효율 등의 많은 장점을 가지고 있는 SRM은 부하토크와 회전속도에 따라 운전특성이 달라지므로 최적인운전을 위해서는 스위칭 각 제어가 필수적이다. 이러한 스위칭 각은 고정자 및 회전자 극호각, 토크 및 속도 등의 여러 변수들에 따라 달라지기 때문에 적정 스위칭 시점을 결정하는데 있어서 어려움이 있다. 따라서 본 논문에서는 부하토크 및 회전속도에 따라 효율이 가장 높은 적정 스위칭 각을 실험을 통해 선정된 후 신경회로망(Neural Network, NN)을 이용하여 전동기 제어에 적용하는 방안에 대해 고찰하였다. 또한 스위칭 각 제어에 있어서 필수적인 순시토크의 추정에 있어서도 신경회로망을 이용하여 인덕턴스의 비선형적인 특성이 고려되도록 하였다. 구현된 스위칭 각 제어기를 실제 시스템에 적용하였으며, 고효율 측면에서 선정된 스위칭 각 제어기의 동특성을 확인함으로써 스위칭 각 제어기의 적합성을 검증하였다.

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.

Key Words : SRM, Torque Estimation Method, Neural Network, Adaptive Switching Angle Control

1. 서 론

최근 간단한 구조와 높은 효율 등의 많은 장점들로

인해 관심이 고조되고 있는 스위치드 릴럭턴스 전동기(Switched Reluctance Motor, SRM)는 부하토크와 회전속도에 따라 운전 특성이 달라지므로, 가변구동에서의 전동기의 최적인운전을 위해서는 부하토크와 회전속도에 따라 적절한 스위칭 각을 적용하여야 한다^{[1]-[5]} 고정자 및 회전자 극호각, 토크 및 속도 등의 여러 변수들로 인해 적정 스위칭 각을 선정하는데 있어서 어려움이 있기 때문에 본 논문에서는 실험을 통해 부하토크와 회전속도에 따라 효율이 가장 높은 적정 스위

*영남이공대 전기자동차과 교수

E-mail : mhkim@ync.ac.kr

접수일자 : 2002. 6.15

1차심사 요청일 : 2002. 6.15 2차심사 요청일: 2002. 8.16

심사완료일 : 2002. 9.12

칭 각을 선정한 후 전동기 제어에 적용하는 방안에 관해 고찰하였다. 또한 제어에 필요한 비선형적인 함수를 구하고, 측정오차의 보정을 위해 신경회로망(Neural Network, NN)을 적용하였다. 스위칭 각 제어의 입력 변수중의 하나인 순시토크의 추정에 있어서 인덕턴스의 비선형적인 특성의 고려를 위해 전류 크기에 따른 인덕턴스의 변화율을 신경회로망을 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 회전을 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 가변부하 및 가변 속도에 따라 적정 스위칭 각을 선정하는데 어려움이 있다.

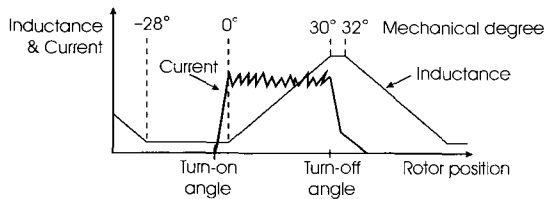


그림 1 3상 6/4극 SRM의 스위칭 각
Fig. 1 Switching angle of 3-phase SRM with 6/4 stator/rotor poles

2.2 효율 측정을 통한 적정 스위칭 각의 선정

전류에 대한 역기전력의 영향이 크지 않은 기저속도 이하의 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. Leroy Somer사의 3000[rpm], 50[Nm] 정격의 FP. 15/30 파워 더 브레이크를 사용하여 부하토크를 일정하게 유지하고, 속도제어를 통해 회전속도를 일정하게 유지한 상태에서 Voltech사의 PM3000을 이용하여 입력 전력을 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.

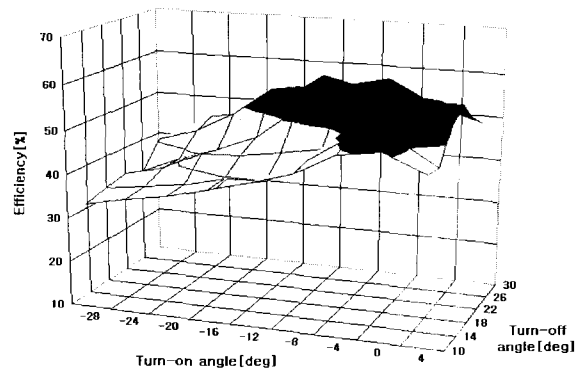


그림 2 스위칭 각에 따른 전동기 효율(500[rpm])
Fig. 2 Motor efficiency according to the switching angle(500[rpm])

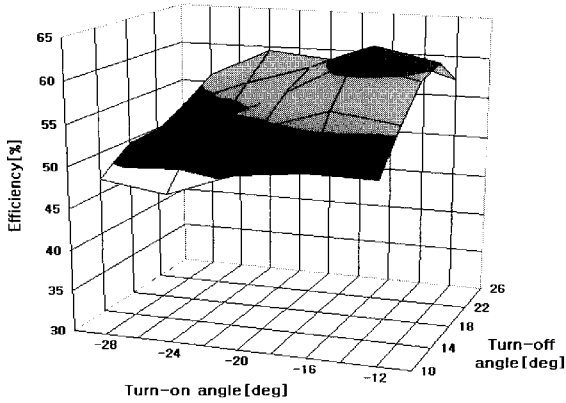


그림 3 스위칭 각에 따른 전동기 효율(3000[rpm])
 Fig. 3 Motor efficiency according to the switching angle(3000[rpm])

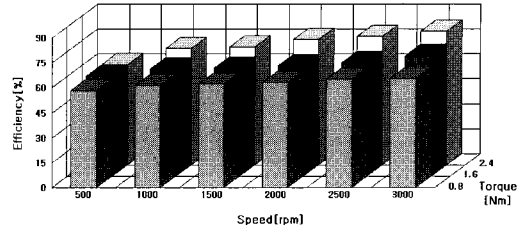


그림 6 토크 및 속도에 따라 측정된 전동기 효율
 Fig. 6 Measured motor efficiency according to the torque and speed

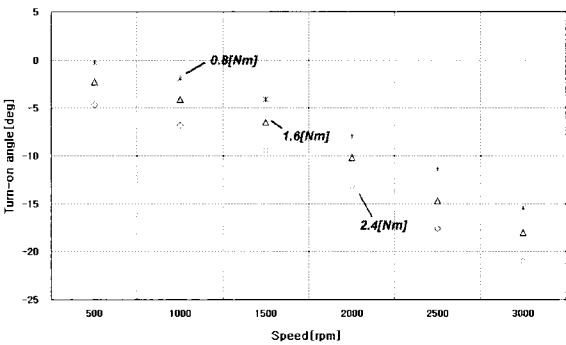


그림 4 효율 측정을 통해 선정된 턴온 각
 Fig. 4 Determinated turn-on angle by efficiency measurement

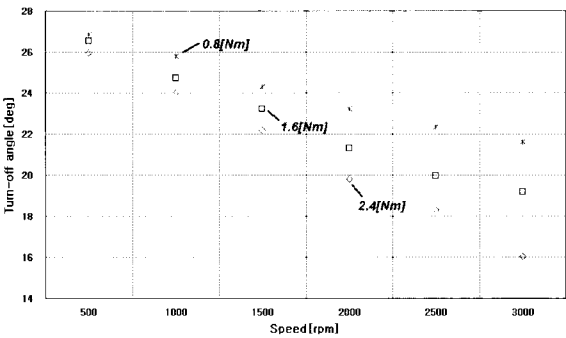


그림 5 효율 측정을 통해 선정된 턴오프 각
 Fig. 5 Determinated turn-off angle by efficiency measurement

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. 이를 위해 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 연산 장치의 고속화와 신경회로망을 위한 소프트웨어가 개발됨에 따라 시간이 많이 소요된다는 신경회로망의 단점이 보완되어 향후 전동기 제어를 비롯한 여러 분야에서 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.

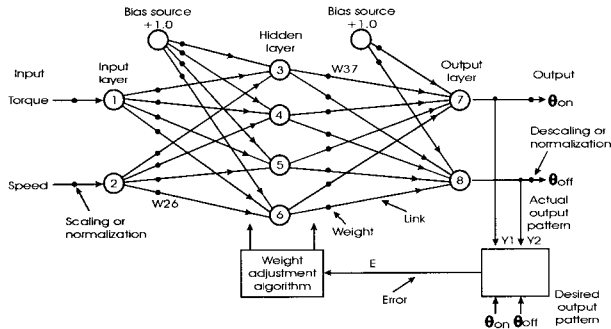


그림 7 스위칭 각을 위한 신경회로망의 구조
Fig. 7 Architecture of Neural Network for switching angle

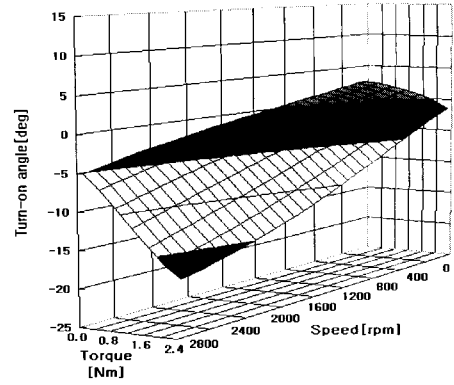


그림 10 학습된 신경회로망에 의한 턴온 각
Fig. 10 Turn-on angle by trained Neural Network

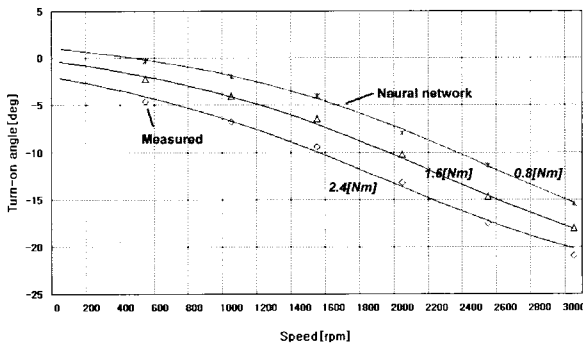


그림 8 측정과 신경회로망에 의한 턴온 각의 비교
Fig. 8 Comparison of the measured and the Neural Network turn-on angle

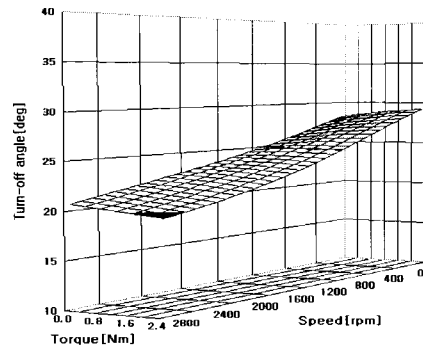


그림 11 학습된 신경회로망에 의한 턴오프 각
Fig. 11 Turn-off angle by trained Neural Network

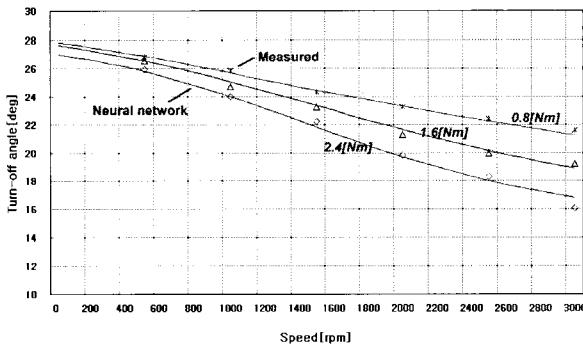


그림 9 측정과 신경회로망에 의한 턴오프 각의 비교
Fig. 9 Comparison of the measured and the Neural Network turn-off angle

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 따른 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. 그림 12는 실험을 통해 측정된 회전자 위치와 전류에 대한 인덕턴스의 크기를 나타내고 있으며, 이러한 측정 데이터를 바탕으로 전류에 대한

인덕턴스 변화율의 비선형적인 함수를 구하기 위해 신경회로망을 적용하였다^[11].

그림 13은 측정에 의한 인덕턴스 변화율과 신경회로망을 통해 구한 인덕턴스 변화율을 나타내고 있으며, 학습된 신경회로망을 통해 구해진 인덕턴스의 변화율이 측정 데이터를 추정하고 있음을 알 수 있다.

그림 14는 각각의 경우에 추정된 순시토크를 나타내고 있으며, 그림 15는 인덕턴스의 값을 일정하게 적용한 경우와 인덕턴스의 비선형적인 특성을 고려한 경우에 추정된 순시토크의 차이를 보여주고 있다.

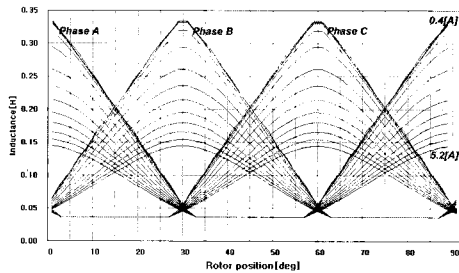


그림 12 회전자 위치와 전류에 대한 인덕턴스의 변화
Fig. 12 Inductance variation according to the rotor position and current

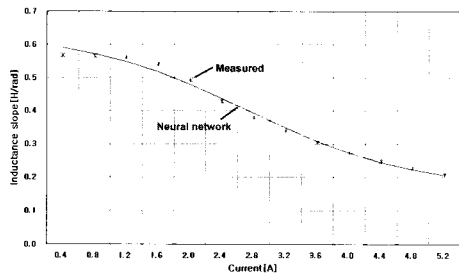


그림 13 학습된 신경회로망에 의한 인덕턴스 변화율
Fig. 13 Inductance slope by trained Neural Network

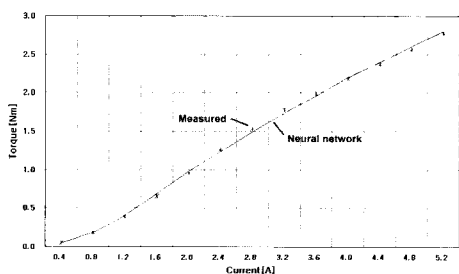


그림 14 전류에 따라 추정된 순시토크
Fig. 14 Estimated instantaneous torque according to current

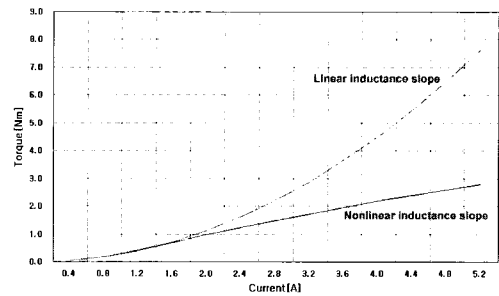


그림 15 인덕턴스의 비선형성에 따른 토크 추정 오차
Fig. 15 Estimated torque error by nonlinear inductance characteristic

4. 제어시스템 구성 및 실험 결과

4.1 제어시스템 구성

본 논문에서 구성한 전체 시스템의 블록도는 그림 16과 같다. 속도 및 전류제어기와 스위칭 각 제어기를 비롯한 모든 제어기는 TMS320F240DSP내에서 디지털 방식으로 구성하여 제어기의 구성이나 설계를 용이하게 하였으며, 컨버터는 제어의 다양성이 뛰어난 비대칭 브리지 컨버터를 적용하였다^{[12][13]}. 또한 회전자 위치정보는 1회전당 600[pulse]를 출력하는 omron사의 E6H-CWZ3E 엔코더 신호를 4채배하여 적용하였으며, 기저속도가 3000[rpm]이고 정격토크가 2.5[Nm]인 전동기의 세부사항은 표 1에 나타난 전동기의 설계상수와 같다.

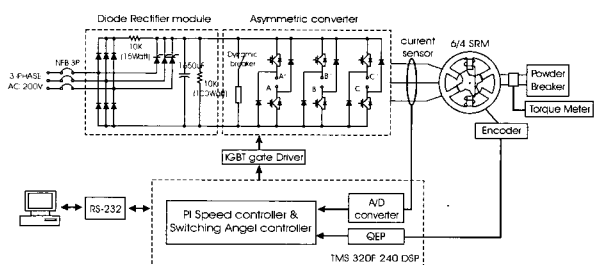


그림 16 제어시스템의 블록도
Fig. 16 Block diagram of the control system

표 1 SRM의 설계상수
Table 1 Design parameters of SRM

상수	3상	정격출력	1[hp]
극수	6/4	정격속도	3000[rpm]
정격전압	300[Vdc]	고정자극호	30[Mdeg]
권선저항	3.9[Ohm]	회전자극호	32[Mdeg]
관성모멘트	0.00026[kg · m ²]	마찰계수	0.0006[Nm · s]

4.2 실험결과

구현된 스위칭 각 제어기의 적합성을 검증하기 위해 실험을 통해 속도응답특성을 확인하였으며, 적정 스위칭 각은 부하토크와 회전속도에 따라 매 스트로크마다 가변되도록 하였다. 그림 17은 1800[rpm], 1[Nm]에서의 속도응답파형과 추정된 토크파형을 나타내고 있으며, 그림 18은 3상의 고정자 권선에 흐르는 전류를 보여주고 있다. 또한 그림 19는 속도 및 추정된 토크에 따라 적용된 스위칭 각을 나타내고 있다. 과도상태에서는 속도 및 요구되는 토크에 따라 스위칭 각이 가변되고 있으며, 정상상태에서는 최고 효율을 위한 스위칭 각이 일정하게 적용되고 있음을 알 수 있다. 그림 20은 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 21은 ± 2000 [rpm]에서의 스위칭 각의 변화를 나타내고 있으며, 속도 및 부하에 따라 적정 스위칭 각이 인가되고 있음을 확인할 수 있다. 또한, 그림 22는 500[rpm] \rightarrow 2500[rpm]의 속도지령에 대한 응답특성을 나타내고 있으며, 그림 23은 적용된 스위칭 각을 나타내고 있다.

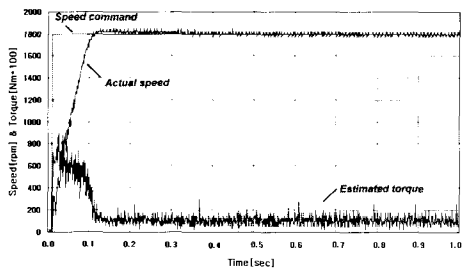


그림 17 1800[rpm], 1[Nm]에서의 속도 및 추정된 토크 파형
Fig. 17 Speed and estimated torque waveforms at 1800[rpm] and 1[Nm]

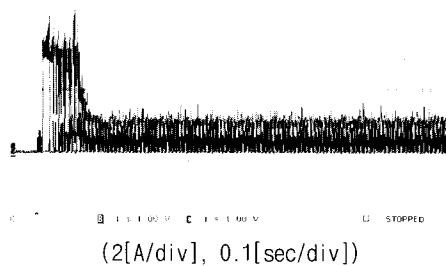


그림 18 1800[rpm], 1[Nm]에서의 3상 전류파형
Fig. 18 3-phase current waveforms at 1800[rpm] and 1[Nm]

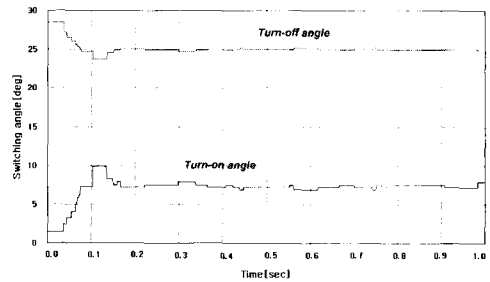


그림 19 1800[rpm], 1[Nm]에서의 스위칭 각의 변화
Fig. 19 Switching angle variation at 1800[rpm] and 1[Nm]

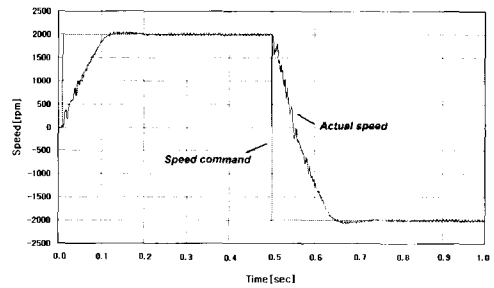


그림 20 ± 2000 [rpm], 1[Nm]에서의 속도응답 특성
Fig. 20 Speed response characteristic at ± 2000 [rpm] and 1[Nm]

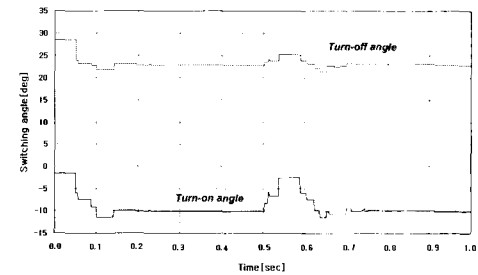


그림 21 ± 2000 [rpm], 1[Nm]에서의 스위칭 각의 변화
Fig. 21 Switching angle variation at ± 2000 [rpm] and 1[Nm]

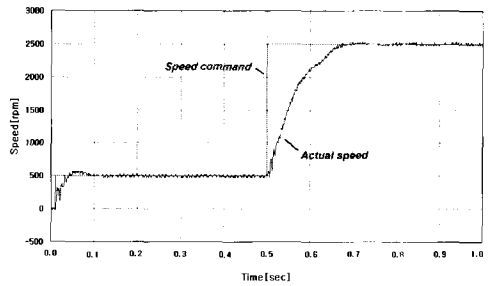


그림 22 500[rpm] \rightarrow 2500[rpm], 1[Nm]에서의 속도응답특성
Fig. 22 Speed response characteristic at 500[rpm] \rightarrow 2500[rpm] and 1[Nm]

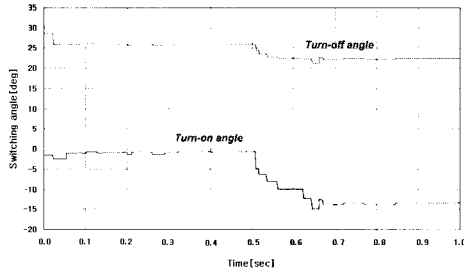


그림 23 500[rpm]→2500[rpm]에서의 스위칭 각의 변화
 Fig. 23 Switching angle variation at 500[rpm]→2500[rpm] and 1[Nm]

5. 결 론

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 방안에 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.

참 고 문 헌

[1] R. Krishnan, Switched Reluctance Motor Drives, CRC Press, 2001.
 [2] T.J.E. Miller, Electronic Control of Switched Reluctance Machines, Newnes Press, 2001.
 [3] B.K. Bose, T.J.E. Miller, and 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 and 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, 김민회, 황돈하, "드림용 SRM의 최적운전을 위한 스위칭각 산정", 대한전기학회 논문집, Vol. 50B, No. 11, pp. 575~582, Nov. 2001.

[6] A.V. Rajarathnam, B. Fahimi, and M. Ehsani, "Neural Network Based Self-Turning 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, and 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, 김민회, "스위치드 리럭턴스 전동기의 인덕턴스 산정에 관한 연구", 전력전자학회 논문집, 제6권, 제4호, pp. 333~340, Aug. 2001.
 [12] 백원식, 김남훈, 최경호, 김동희, 김민회, 황돈하, "디지털 히스테리시스 제어기를 이용한 SRM의 위치제어시스템", 전력전자학회 추계학술대회 논문집, pp. 41~45, Dec. 2001.
 [13] 김민회, 백원식, 김남훈, 최경호, 김동희, "디지털 히스테리시스 제어기를 이용한 SRM의 위치제어시스템", 전력전자학회 논문집, June 2001.

저 자 소 개



백원식(白元植)

1970년 10월 20일생. 1996년 계명대 수학과 졸업. 2002년 영남대 대학원 전기공학과 졸업(석사). 현재 동 대학원 전기공학과 박사과정.



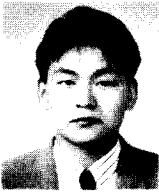
김민회(金玟會)

1953년 7월 23일생. 1974년 영남대 전기공학과 졸업. 1980년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1989년 중앙대 대학원 전기공학과 졸업(공학박사). 1979년 3월~현재 영남이공대학 전기자동차과 교수. 1993년 7월~1995년 8월 미국 테네시 주립대학 전기공학과. 전력전자응용연구소(PEAC) 연구교수. 1996년 8월 IECON '96 최우수논문상 수상. 당 학회 재무이사.



김남훈(金男燾)

1973년 6월 12일생. 1998년 삼척대 제어계측공학과 졸업. 2000년 영남대 대학원 전기공학과 졸업(석사). 현재 동 대학원 전기공학과 박사과정 수료.



최경호(崔景好)

1967년 4월 28일생. 1991년 영남대 전기공학과 졸업. 1995년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1995년 1월~2000년 1월 (주)효성 전동기부 근무. 2002년 동 대학원 전기공학과 졸업(박사). 현재 경북전문대학 전임강사.



김동희(金東熙)

1950년 11월 20일생. 1973년 영남대 전기공학과 졸업. 1975년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1987년 Kobe대학 졸업(박사). 1987년~1989년 전기연구원 전력전자 연구부장. 현재 영남대 전기전자공학부 교수. 당 학회 경상지부장.