

## 스위치드 릴럭턴스 전동기의 히스테리시스 및 PI 전류제어기 응답특성

(A Hysteresis & PI Current Controller Response Characteristic of SRM)

백원식 · 김동희\* · 김민희

(Won-Sik Baik · Dong-Hee Kim · Min-Huei Kim)

### 요 약

본 논문에서는 스위치드 릴럭턴스 전동기 (SRM)의 히스테리시스 및 PI 전류제어기법의 응답특성에 관해 고찰하였다. SRM의 전류제어를 위해 가장 널리 적용되는 히스테리시스 제어기법은 전류응답특성이 빠르다는 장점이 있으나, 스위칭 주파수의 가변으로 인한 소음이 단점으로 알려져 있다. SRM의 전류제어를 위해 적용되는 다른 전류제어기법으로는 PI 전류제어기법이 있으나, 비선형적인 특성으로 인해 일반적인 전동기 제어시스템과 같이 몇몇 고정된 변수들로 제어기를 설계하기가 용이하지 않다. 본 논문에서는 제한된 범위 내에서 전동기가 구동된다는 가정하에 선형화를 통한 PI 전류제어기를 설계하였다. 1마력 SRM을 적용하여 전류제어 및 속도제어 실험을 수행하였으며, 실험을 통해 얻어진 데이터는 적용 용도에 적합한 전류제어기법 선정을 위한 참고자료가 될 것으로 사료된다.

### Abstract

This paper presents a comparison of different current controller response characteristics of SRM. The most common current controllers of the SRM is hysteresis type. The hysteresis controller is easy to implement and fast current control response, but has the inherent disadvantage of switching frequency variations. The other common type of current controller is PI scheme. The design of a classical PI current controller with fixed parameters for SRM is not an easy task due to the extreme nonlinear characteristics. In this paper, some linearization technique is used for design of PI current controller. Experimental results of 1-hp SRM are presented for the basic reference data which can be used to select the proper current control scheme according to the applications.

Key Words : SRM, Current controller, PI, Hysteresis

### 1. 서 론

스위치드 릴럭턴스 전동기는 전력전자 및 디지털 연산장치의 발전에 따라 가변속 구동시스템과 같은 분야로의 응용연구 및 실용화가 활발히 이루어지고

\* 주저자 : 영남대학교 전기공학과 교수  
Tel : 053-810-2488, Fax : 053-810-4629  
E-mail : dhkim@yu.ac.kr  
접수일자 : 2006년 10월 27일  
1차심사 : 2006년 10월 31일  
심사완료 : 2006년 11월 20일

## 스위치드 릴럭턴스 전동기의 히스테리시스 및 PI 전류제어기 응답특성

있으며, 효율개선이나 소음저감 등을 위한 제어기법 개발이 다양하게 진행되고 있다[1-4]. SRM은 회전자 위치에 따라 적정 고정자 권선을 여자시킴으로써 회전력을 발생하며, 기존의 교류전동기 제어시스템과 같이 전류 및 속도 제어루프로 구성된다. 전류 및 속도제어기로 널리 적용되고 있는 PI 제어기법은 구현이 용이하고 응답특성이 양호하며, 비례 및 적분 제어를 통해 과도상태 및 정상상태에서 요구되는 특성을 얻을 수 있다. PI 제어기법과 아울러 널리 적용되고 있는 히스테리시스 제어기법은 설계가 용이하고 우수한 제어응답특성 등을 장점으로 한다[7-10].

본 논문에서는 SRM의 전류제어기를 히스테리시스 및 PI 전류제어기로 구성하고, 전류제어루프를 제외한 나머지 제어기는 동일하게 한 상태에서 각각의 응답특성을 확인하였다. 실험결과를 통해 적용분야에 적합한 제어기법의 선택을 위한 기초가 될 것으로 사료된다.

## 2. 전류제어기 설계 및 응답특성

### 2.1 히스테리시스 전류제어기

히스테리시스 전류제어 기법은 구현이 용이하고 빠른 응답특성 등의 장점으로 인해 널리 활용되고 있다. 히스테리시스 전류제어는 그림 1과 같이 지령값과 실제값과의 오차가 히스테리시스 밴드 내에 있으면 이전 상태를 유지하고, 히스테리시스 밴드 범위를 초과하면 스위칭 상태를 변화시킨다.

히스테리시스 전류제어는 전류리플이 크다는 단점이 있기 때문에 보다 정밀한 제어를 위해 3-레벨 히스테리시스 제어기가 적용될 수 있다. 지령값과 실제값과의 전류오차 크기에 따라 듀티비 D는 그림 2와 같이 결정된다. SRM은 인덕턴스가 증가하는 시점에서 필드형태의 전류지령이 제어기로 인가되므로, 초기의 빠른 전류 응답을 위해서 전류오차가 큰 구간에서는 제어주기 동안 전체 전압이 인가되고 (D=1), 전류가 지령값에 가까운 구간에서는 50[%]의 듀티비를 적용함으로써 전류리플을 저감할 수 있다.

히스테리시스 전류제어기의 히스테리시스 밴드는 제어특성을 좌우하는 주요 변수이며, 전기적인 시정

수, 피드백 루프의 정밀도 등을 고려하여 적정 값으로 설계된다. 본 논문에서는 시행오차를 통해 전류리플의 크기를 관측함으로써 적정 값을 선정하였으며, High와 Low 밴드를 각각 500[mA]와 50[mA]로 설정하였다.

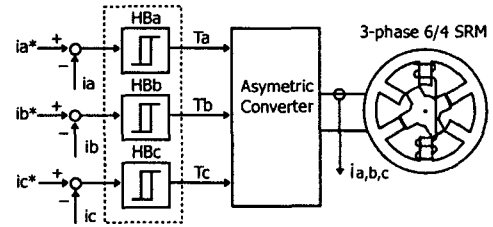


그림 1. 3상 SRM의 히스테리시스 전류제어기  
Fig. 1. Hysteresis current controllers of 3-phase SRM

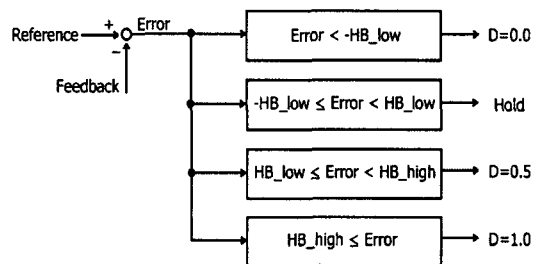


그림 2. Multi-level 히스테리시스 전류제어기  
Fig. 2. Multi-level Hysteresis current controller

### 2.2 PI 전류제어기

동기좌표계로의 좌표변환을 통해 직류형태로 전류를 제어하는 교류전동기와는 달리 SRM은 고정좌표계 상에서 맥류파 형태로 전류를 제어하며, 전류(轉流) 시점에서는 전류가 급격히 변화한다. SRM은 역률개선과 전원장치의 정격을 저감하기 위해 포화영역에서 구동하도록 설계되며, 이로 인해 비선형적인 특성을 나타낸다. 이러한 비선형적인 특성은 전체 운전영역에 대해 고성능의 제어기 설계를 어렵게 한다. 따라서 제한된 범위 내에서 전동기가 구동된다는 가정 하에서 제어기의 설계가 이루어지며, 식 (1)은 상간의 상호결합을 무시하고, 인덕턴스가 일정하다는 가정하의 전압방정식을 나타내고 있다.

$$v_s = R_s i_s + L_s \frac{di_s}{dt} + K_e \omega \quad (1)$$

그림 3은 전압방정식을 바탕으로 비례이득  $K_p$  및 적분시간  $T_i$ 로 구성된 PI 전류제어기의 블록도를 나타내고 있다.

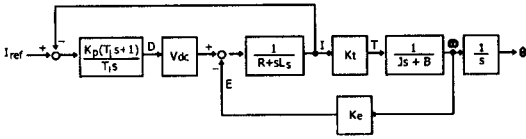


그림 3. PI 전류제어기 블록도  
Fig. 3. Block diagram of PI current controller

전기기기에서는 기계적인 시정수  $J/B$ 가 전기적인 시정수  $L_s/R$  보다 매우 크기 때문에 역기전력으로 인한 영향을 무시할 수 있다. 이러한 가정 하에서 전류제어루프는 다음과 같이 간략화 될 수 있다.

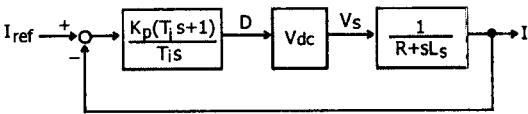


그림 4. 간략화된 PI 전류제어기의 블록도  
Fig. 4. Simplified block diagram of PI current controller

그림 4의 블록도로부터 전류제어기의 개루프 전달함수는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\frac{I_{ref}}{I} = \frac{K_p V_{dc} (T_i s + 1)}{L_s T_i s^2 + (RT_i + V_{dc} K_p T_i) s + K_p V_{dc}} \quad (2)$$

$$= \frac{\omega_n^2 + k_1 s}{s^2 + 2\zeta \omega_n s + \omega_n^2}$$

$$\zeta = \frac{RT_i + V_{dc} K_p T_i}{2\sqrt{K_p V_{dc} L_s T_i}}, \quad \omega_n = \sqrt{\frac{K_p V_{dc}}{L_s T_i}}$$

$$k_1 = \frac{K_p V_{dc} T_i}{L_s T_i} \quad (3)$$

전달함수를 통해 비례이득  $K_p$  및 적분시간  $T_i$ 는 요구되는 고유주파수  $\omega_n$ 과 감쇠비  $\zeta$ 로부터 다음과 같이 계산할 수 있다.

$$T_i = \frac{2\zeta \omega_n L_s - R}{\omega_n^2 L_s}, \quad K_p = \frac{\omega_n^2 L_s T_i}{V_{dc}} \quad (4)$$

전달함수의 고유주파수  $\omega_n$ 는 샘플링 타임  $T_s$ 와 밀접한 관련이 있으며, 설정된 샘플링 타임으로부터  $\omega_n \cdot T_s$  값이 0.2~0.6이 되도록  $\omega_n$ 를 선정하고 감쇠비에 따른 응답을 확인함으로써 비례이득  $K_p$  및 적분시간  $T_i$ 를 설계할 수 있다[5-6].

피드백 제어시스템의 제어기 설계를 위한 설계기법으로는 모델의 불확실성에도 불구하고 만족할 만한 설계가 가능한 주파수응답 설계법이 널리 적용되고 있다. 전달함수를 통한 개루프 및 폐루프 보드선도의 이득과 위상의 크기를 확인함으로써 안정도와 제어기의 성능을 관측할 수 있다. 적용분야에 따라 차이는 있으나 제어기의 이득을 조정하여 개루프 보드선도에서의 이득여유는 10~25[dB], 위상여유는 35~80[°] 이상이 되게 설계함으로써 안정된 시스템 구현이 가능하다고 알려져 있다[6].

그림 5, 6, 7은 각각  $\omega_n \cdot T_s = 0.2$ 인 경우의  $\zeta$  값에 따른 개루프 보드선도, 폐루프 보드선도 및 스텝응답을 나타내고 있다. 오버슈트를 고려하여  $\zeta = 1$ 로 설정하였고, 개루프 보드선도에서 위상여유는 80[°], 스텝응답에서 오버슈트는 10[%]로 관측되었다.

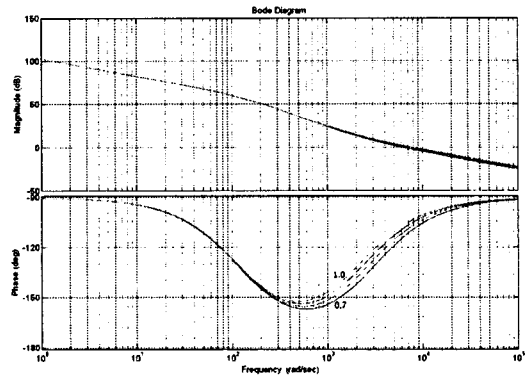


그림 5. 감쇠비에 따른 개루프 보드선도 ( $\zeta = 0.7 \sim 1.0$ )  
Fig. 5. Open loop bode plot according to damping ratio ( $\zeta = 0.7 \sim 1.0$ )

스위칭 릴럭턴스 전동기의 히스테리시스 및 PI 전류제어기 응답특성

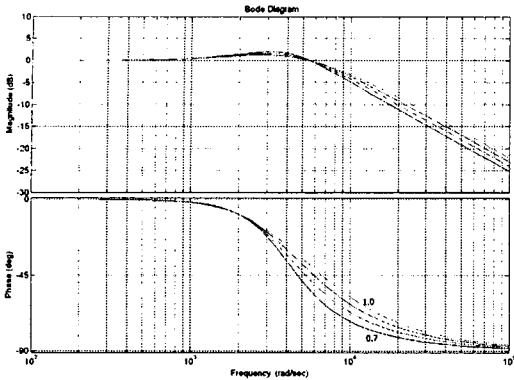


그림 6. 감쇠비에 따른 페루프 보드선도(  $\zeta=0.7\sim 1.0$  )  
 Fig. 6. Closed loop bode plot according to damping ratio(  $\zeta=0.7\sim 1.0$  )

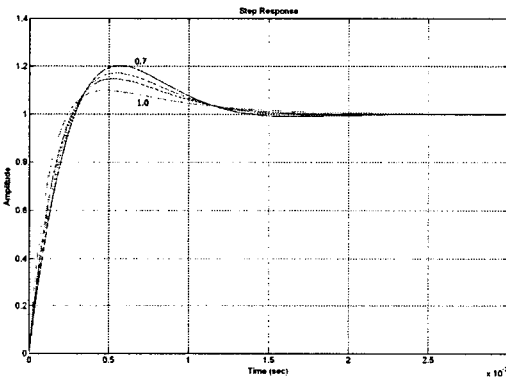


그림 7. 감쇠비에 따른 페루프 스텝응답(  $\zeta=0.7\sim 1.0$  )  
 Fig. 7. Closed loop step response according todamping ratio(  $\zeta=0.7\sim 1.0$  )

3. 시스템 구성 및 실험결과

3.1 제어시스템 구성

SRM의 구동을 위한 제어기법은 부분적으로는 직류전동기나 교류전동기 구동을 위한 제어시스템과는 차이가 있으나, 전류, 속도 및 위치제어 루프로 구성되는 점은 동일하다. 그림 8은 3상 SRM의 페루프 속도제어를 위한 제어시스템 구조를 나타내고 있으며, 일반적인 전동기 제어시스템과 유사한 구조의 전류 및 속도 제어루프와 스위칭 각도제어기 및 전류(轉流)제어기로 구성되어 있다.

제어시스템에서 구동용 컨버터로는 제어가 용이

한 비대칭 브리지 컨버터가 적용되었고, 정격이 1200[V], 75[A]인 Semikron사의 IGBT SMK75GAL 과 SMK 75GAR을 사용하였다. 게이트 드라이브는 Semikron사의 SKHI-71을 사용하였으며, 부하토크는 Leroy Somer사의 3,000[rpm], 5[Nm], 정격의 FP. 15/30 파우더 브레이크를 사용하여 제어하였다. 모든 제어기는 Texas Instrument사의 TMS320 F2812 DSP를 사용하여 디지털방식으로 구성함으로써 제어기의 구성이나 설계를 용이하게 하였다. 그림 9는 구성된 실험 장치를 나타내고 있으며, 표 1은 실험에 적용된 SRM의 설계상수를 나타내고 있다.

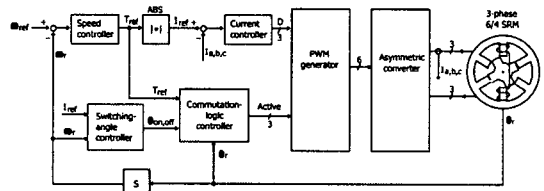


그림 8. 페루프 속도제어시스템의 블록도  
 Fig. 8. Block diagram of closed loop speed control system

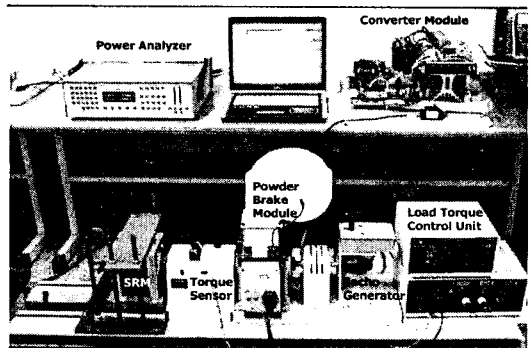


그림 9. 실험장치 구성  
 Fig. 9. Experimental system setup

표 1. SRM의 설계상수  
 Table 1. Design parameters of SRM.

상 수	3상	정격출력	1[hp]
극 수	6/4	정격속도	3000[rpm]
정격전압	300[Vdc]	고정자극호	30[Mdeg]
권선저항	3.828[Ohm]	회전자극호	32[Mdeg]
관성모멘트	0.00026[kg · m <sup>2</sup> ]	마찰계수	0.0006[Nm · s]

### 3.2 전류제어 실험결과

그림 10과 11은 50[Hz]의 전류지령에 대한 히스테리시스 및 PI 전류제어기의 전압 및 전류파형을 나타내고 있다. 두 제어기법 모두 초기에는 빠른 전류상승을 위해 스위칭 소자는 턴온 상태를 유지하고, 전류가 지령값 가까이 증가한 후에는 초평이 이루어지고 있음을 알 수 있으며, 그림 10의 전압 및 전류파형으로부터 히스테리시스 제어기의 스위칭 주파수가 변동함을 알 수 있다. 또한 그림 12는 두 제어기법의 전류응답특성을 나타내고 있으며, 정상상태 도달시간은 히스테리시스 제어기가 1[ms]정도 빠르나 전류리플이 크다는 것을 알 수 있다.

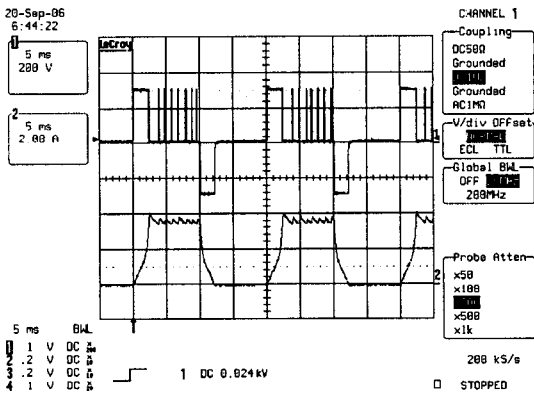


그림 10. 히스테리시스 제어기 전압 및 전류파형  
Fig. 10. Voltage & current waveforms of Hysteresis controller

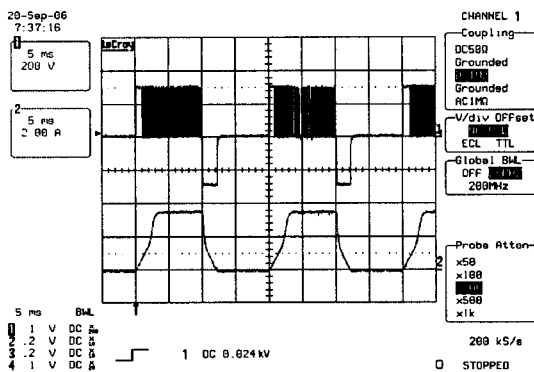


그림 11. PI 제어기 전압 및 전류파형  
Fig. 11. Voltage & current waveforms of PI controller

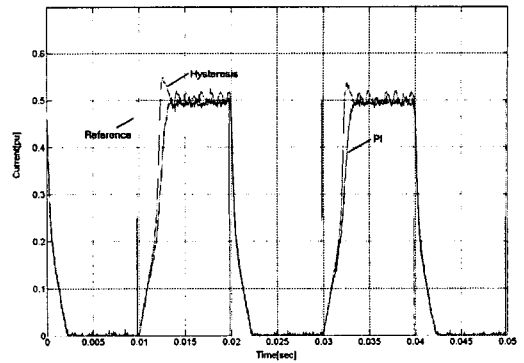


그림 12. 전류제어기 응답 비교  
Fig. 12. Comparisons of current controller response

### 3.3 속도제어 실험결과

전류제어기를 제외한 나머지 부분은 동일하게 한 상태에서 전류제어기를 히스테리시스와 PI 전류제어기를 적용한 경우의 속도응답을 관측하였으며, 속도제어기는 PI 제어기법을 적용하였다.

그림 13과 14는 1[Nm]의 부하가 인가된 상태에서  $\pm 1,500$ [rpm]의 속도지령에 대한 히스테리시스 및 PI 전류제어기를 적용한 경우의 속도응답 및 전류파형을 나타내고 있으며, 그림 15는 속도응답파형의 비교를 나타내고 있다. 적용된 전류제어기법에 따라 속도응답의 동특성이 달라짐을 알 수 있으며, 히스테리시스 전류제어기법을 적용한 경우 정상상태 도달시간은 0.15초정도 빠르나 PI 제어기법에 비해 오버슈트의 크기가 증가함을 알 수 있다.

그림 16은 정상상태에서의 속도제어특성을 나타내고 있으며, 두 제어기법이 거의 동일한 특성을 나타내고 있음을 알 수 있다. 그림에서 정상상태에서의 속도변동은 두 제어기법 모두 최대  $\pm 3$ [rpm]으로 관측되었으며,  $\pm 1,500$ [rpm]에서 0.4[%]의 제어정밀도가 얻어졌음을 확인할 수 있다.

그림 17은 구동속도에 따라 측정된 소음의 크기를 나타내고 있으며, 히스테리시스 전류제어기법을 적용한 경우 저속에서는 스위칭 주파수의 변동으로 인해 PI 전류제어기법에 비해 소음이 증가함을 알 수 있으며, 고속에서는 거의 동일한 소음이 관측되었음을 알 수 있다.

스위치드 릴럭턴스 전동기의 히스테리시스 및 PI 전류제어기 응답특성

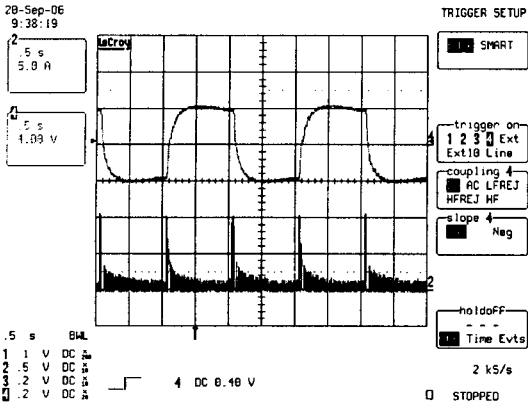


그림 13. 속도제어 특성(히스테리시스 전류제어)  
Fig. 13. Speed control characteristics(Hysteresis)

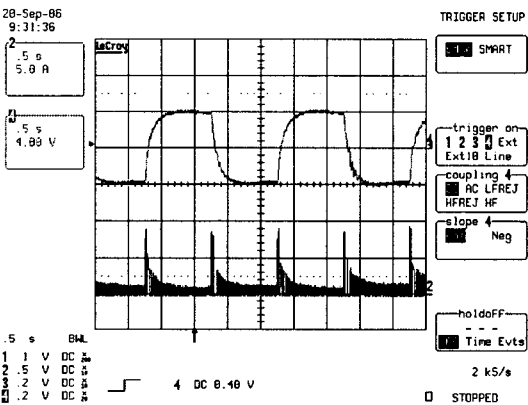


그림 14. 속도제어 특성(PI 전류제어)  
Fig. 14. Speed control characteristics(PI)

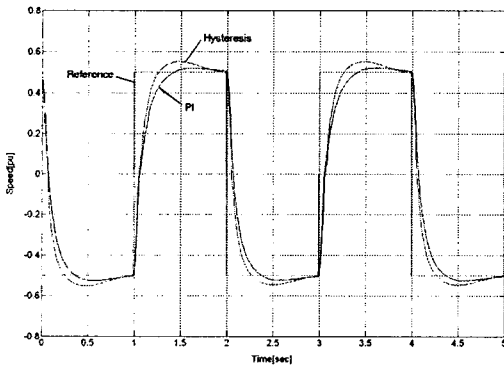


그림 15. 속도응답 비교  
Fig. 15. Comparisons of speed response

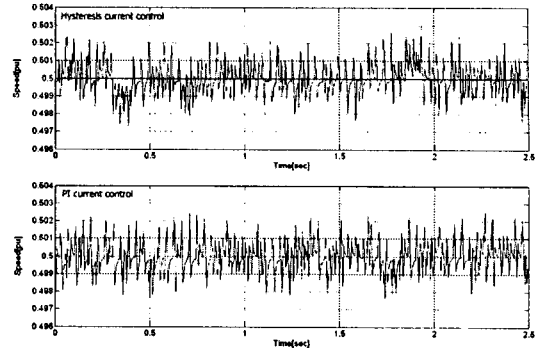


그림 16. 정상상태 속도파형  
Fig. 16. Speed waveforms at steady state

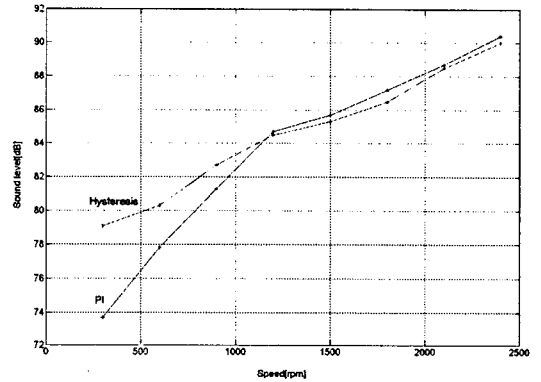


그림 17. 측정된 소음의 크기(A-weighting)  
Fig. 17. Measured noise level(A-weighting)

4. 결 론

본 논문에서는 SRM의 전류제어기로 널리 적용되고 있는 히스테리시스 제어기법과 PI 전류제어기법의 응답특성을 확인하였다. 제한된 구동영역에서 우수한 응답특성이 얻어지는 히스테리시스 제어기와 PI 전류제어기를 설계하고, 전류제어기를 제외한 나머지 제어기는 동일하게 한 상태에서 각각의 제어기법의 전류응답과 속도응답특성 및 소음의 크기를 관측하였다. 실험결과를 통해 히스테리시스 제어기는 빠른 응답특성을 나타내었으나, 저속영역에서 스위칭 주파수의 변동과 전류리플로 인해 PI 제어기법에 비해 소음이 크다는 것을 확인하였다.

본 논문은 산업자원부가 주관하고 한국전력공사가 지원하는 2006년 전력산업기초인력양성사업으로 영남이공대학 전력응용기술연구센터의 지원에 의하여 수행되었음.

## References

- [1] T.J.E Miler, *Electronic Control of Switched Reluctance Machines*, Newnes Pub., 2001.
- [2] R. Krishnan, *Switched Reluctance Motor Drives*, CRC Press, 2001.
- [3] Won-Sik Baik, Kyeong-Ho Choi, Dong-Hee Kim, Min-Huei Kim, "A Motion Control System of SRM using Digital Hysteresis Controller," *Proceeding of ICEE*, pp 803-807, July, 2002.
- [4] Won-Sik Baik, Min-Huei Kim, Nam-Hun Kim, Dong-Hee Kim, "Position Sensorless Control System of SRM using Neural Network," *Proceeding of PESC*, pp 3471-3475, June, 2004.
- [5] Karl J. Astrom, Bjorn Wittenmark, *Computer-Controlled Systems*, Prentice Hall, 1997.
- [6] George Ellis, *Control System Design Guide*, Academic press, 2000.
- [7] M. Azizur Rahman, Tawfik S. Radwan, Ali M. Osheiba, Azza E. Lashine, "Analysis of Current Controllers for Voltage-Source Inverter," *IEEE Trans. on I.E.*, Vol. 44, No. 4, pp 477-485, Aug., 1997.
- [8] Bimal K. Bose, "An Adaptive Hysteresis-Band Current Control Technique of a Voltage-Fed PWM Inverter for Machine Drive System," *IEEE Trans. on I.E.*, Vol. 37, No. 5, pp 402-408, Oct., 1990.
- [9] Steven E. Schulz, Khwaja M. Rahman, "High-Performance Digital PI Current Regulator EV Switched Reluctance Motor Drives," *IEEE Trans. on I.A.*, Vol. 39, No. 4, pp 1118-1126, July/Aug., 2003.
- [10] F. Blaagierg, P. C. Kjaer, P. O. Rasmussen, C. Cossar, "Improved digital current control methods in switched reluctance motor drives," *IEEE Trans. on P.E.*, Vol. 14, No. 3, pp 563-572, May, 1999.

## ◇ 저자소개 ◇

### 백원식 (白元植)

1970년 10월 20일생. 1996년 계명대 자연과학대학 수학과 졸업. 2002년 영남대 대학원 전기공학과 졸업(석사). 2007년 2월 동 대학원 전기공학과 졸업(박사). 현재 영남이공대학 겸임교수.

### 김동희 (金東熙)

1950년 11월 20일생. 1973년 영남대 공대 전기공학과 졸업. 1975년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1987년 Kobe 대학 졸업(박사). 1987년~1989년 한국전기연구원 전력전자 연구부장. 당 학회 경상지부장. 2000년 9월~2001년 2월 Kyushu 대학 교환교수. 현재 영남대 공대 전기공학과 교수. 대한전기학회 대구·경북지부 지회장.

### 김민희 (金玟熙)

1951년 8월 25일생. 1974년 영남대 공과대학 전기공학과 졸업. 1980년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1989년 중앙대 대학원 전기공학과 졸업(박사). 1979년 3월~현재 영남이공대학 전자기동화과 교수. 1993년 7월~1995년 8월 미국 테네시 주립대학 전기공학과 전력전자응용연구센터(PEAC) 연구교수. 1996년 8월 IECON'96 최우수논문상 수상. 전력전자학회 이사, 부회장, 감사 역임. 현재 본 학회 조사 이사.