

견인용 3상 SRM의 소음특성 해석

Noise Characteristic Analysis of 3-phase SRM for Traction Applications

安 珍 雨* · 李 東 熙** · 安 永 株***
(Jin-Woo Ahn · Dong-Hee Lee · Young-Joo An)

Abstract - The switched reluctance motor(SRM) drive system provides a good adjustable speed and torque characteristics. SRM has the possibility of maintaining full power over a wide speed range. So, many attempts are being done from home appliances to industrial machinery and tools. Especially, the traction drive of SRM is one of a good application due to it's torque characteristics.

However, because of the switching mechanism, it has some disadvantage of noise and vibration. It is difficult to adopt to an appliance demanding silence. A noise simulations and test of 3-phase 6/4, 6/8 and 12/8 SRM were done in other to compare each other. The test results show that 12/8 SRM has good noise characteristics.

Key Words : Switched Reluctance Motor, traction drive, acoustic noise, pole combination

1. 서 론

최근 전력용 스위칭 소자의 개발 및 마이크로 전자공학의 발전으로 인하여 고성능, 고기능의 제어방식이 실현됨에 따라 이를 응용한 새로운 전동기 개발이 활발히 연구되고 있다. 특히 기존의 DC 전동기에서 브러시의 사용으로 인한 유지 및 보수의 어려움을 극복하기 위해 브러시리스 방식의 전동기가 대안으로 연구되고 있다.

스위치드 릴럭턴스 전동기(Switched Reluctance Motor, 이하 SRM)는 전자기적 구조가 간단하고 견고하며, 고효율, 고 토크/관성비, 넓은 범위의 가변속 운전 등의 장점을 가진 전동기로서 근래 여러 산업분야 및 가전 분야에 적용범위를 넓혀가고 있는 추세이다. SRM은 전자 에너지 변환기에서 릴럭턴스 토크를 극대화시킨 전동기구조로서 전력용 스위칭 전원에 가장 적합한 형태이다.

최근까지의 개발연구는 토크, 효율, 신뢰도 및 경제성 등에 관하여 연구가 집중되어 있었다[1,2]. 그러나 SRM의 문제점의 하나인 소음에 관한 연구가 상대적으로 적어, 정숙을 요하는 전동기 응용에 있어서는 적용에 어려움이 있었다. 특히 견인용 응용에 있어서도, 실내용 수송수단이나 전기자동차 등의 응용에도 소음문제는 SRM의 단점으로 지적되고 있다. 본 논문에서는 견인용 전동기로 채택하기 위해 선정된 3상 전동기를 극수와 형상에 따라 소음 정도를 시뮬레이션을

해 계산하여, 소음발생이 적은 극수를 선정한다. 극수가 선정 되면 소음을 고려함과 동시에 기계적인 구조를 조정하여 최소 소음발생의 전동기 설계를 할 수 있도록 한다. 이를 위해 요구성능을 만족하는 3상 전동기를 설계하고, 설계한 전동기의 소음특성을 검토하기 위해 소음해석 전용 프로그램을 사용하여 시뮬레이션하고 그 결과를 제시한다. 또한 실제 제작된 전동기의 소음을 측정하여 결과를 검증한다.

2. SRM의 기본 구동원리

그림 1은 일반적인 SRM 드라이브 시스템을 나타낸 것이며, 식 (1)은 발생토크이다.

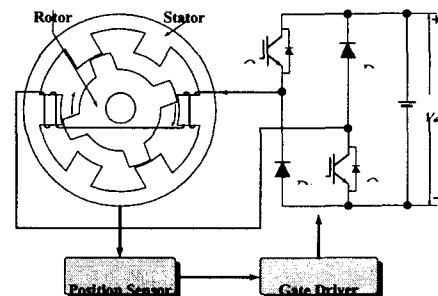


그림 1. SRM 드라이브 시스템
Fig. 1 SRM drive system

발생 토크는 식(1)에서 알 수 있듯이 스위칭 전류의 제곱과 회전자의 위치각에 대한 인덕턴스의 변화율에 비례한다. 실제 전동 토크는 인덕턴스의 상승구간에 권선에 전류가 흐

* 正 會 員 : 경성대 전기전자컴퓨터공학부 교수 · 工博
E-mail : jwahn@ks.ac.kr

** 正 會 員 : Otis-LG 선임연구원 · 工博

*** 正 會 員 : 부경대 전기·제어계측공학부 조교수 · 工博
接受日字 : 2003年 7月 4日
最終完了 : 2004年 1月 29日

를 경우 존재하며, 인덕턴스 하강구간에 이르기까지 전류의 소호가 이루어지지 않으면 부의 토크가 발생한다. 또한 상간 전류(commutation)작용이 원활하지 못하면, 토크 발생구간에서 맥동이 발생하거나 전동기의 토크-속도특성의 안정도가 낮게 되며, 이는 진동소음의 원인이 된다.

$$T_e = \frac{\partial W'_c}{\partial \theta} = \frac{1}{2} i^2 \cdot \frac{dL}{d\theta} \quad (1)$$

여기서 i 는 상전류, L 은 인덕턴스이다.

3. 소음발생 원인과 저감방안

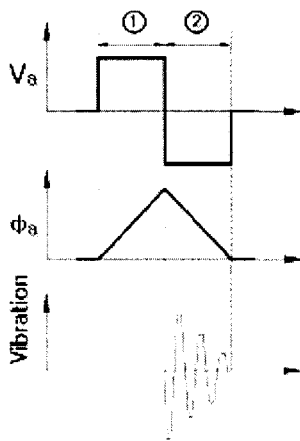
진동 및 소음 발생 원인으로 크게 기계적인 원인과 전자기적인 원인이 있다. 기계적인 원인으로서는 회전자의 동심도, 직전도, 접촉 마찰 및 중량 불균형 제작 등과 같은 제작상의 문제와 베어링과 같은 적용부품에서의 기계적인 진동과 공기와의 마찰 등에 의해 소음이 있다. 전자기적인 원인은 상 스위치의 온, 오프 순간에 발생하는 갑작스런 기자력의 변화에 의한 수축 팽창작용 등이 있다.

이 중 여러 연구보고에 의하면 SRM의 진동, 소음은 주로 전자기적인 원인인 기자력 변화에 의한 수축 팽창작용에 의한 고정자의 방사방향의 힘의 변동에 의해 발생하는 것으로 보고되고 있다[3,4].

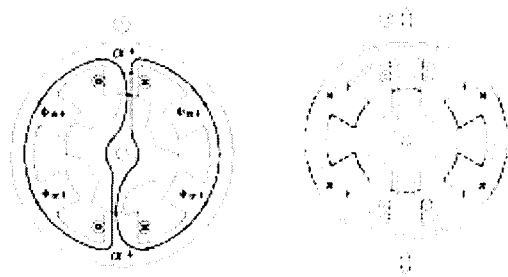
SRM의 회전력 발생을 위한 주기적인 권선여자로서 인하여 고정자극과 회전자극 사이에 방사방향의 전자적인 인력이 작용한다. 이러한 인력은 여자전류와 고정자극과 회전자극 사이의 공극길이 및 인덕턴스에 의해서 식(2)와 같이 나타낼 수 있다[5].

$$F_r = (\theta, g, i) = -\frac{1}{2} i^2 \frac{L(\theta, g)}{g} \quad (2)$$

이러한 인력이 지속적으로 발생과 소거를 반복함으로써 전동기의 고정자 프레임을 진동시키고, 청각적 소음을 발생시킨다.[3-5]



(a) 전압, 자속 및 진동



(b) 스위치 온 (c) 스위치 오프

그림 2. 스위칭 온-오프 시점에서의 방사방향의 진동

Fig. 2 Radiational vibration at switching on-off

그림 2는 스위칭 온-오프 시점에서의 전동기 고정자의 방사방향으로의 진동을 나타낸다. 구간 ①은 a상이 여자되는 구간이며, 구간 ②는 a상의 여자가 제거되는 구간이다. 구간 ①에서는 상권선에 기자력이 인가되어 고정자의 자극부분이 회전자극의 중심방향으로 전자력이 작용하는 구간이며, 구간 ②에서는 상권선에 인가된 기자력을 소호함으로써 방사방향의 급격한 전자력의 변화가 발생하여 진동을 유발시킨다.

진동은 스위칭 온 구간보다 스위칭 오프구간에 의해서 발생한다[3-8]. 이는 부의 토크 발생을 억제하기 위하여 신속하게 상전류를 소호하는 것이 전동기의 진동과 소음을 더욱 감소시키기 때문이다.

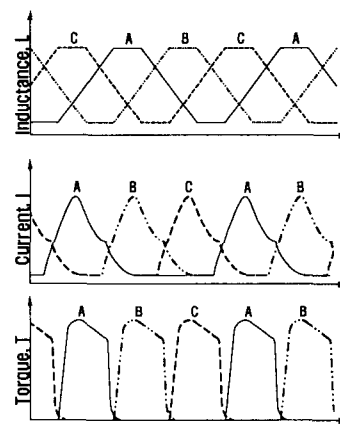


그림 3. 인덕턴스 프로파일, 전류와 토크

Fig. 3 Inductance profile, current and torque of each phase

그림 3은 3상 SRM에서 각 상을 순차적으로 여자할 경우 전류(commutation)로 인해 토크 발생구간이 불연속적이 되는 것을 보여준다. 이러한 토크리플 또한 진동과 소음으로 나타난다.

진동과 소음을 감소시키는 방안으로는 발생된 진동을 상쇄하도록 스위칭 소자를 다단계로 스위치 온, 오프시키는 기법[6,7], 전동기의 자기회로를 적절하게 설계하여 운전영역의 공진모드를 제거하는 방법[8] 그리고 SRM의 권선방식과 여자방식을 기존의 방식과 다르게 함으로써 진동, 소음을 감소시키는 방법[9] 등이 제시되어 왔다.

본 연구에서는 전동기의 진동소음을 저감하기 위해 제안된

여러 방법 중 전동기의 설계측면에서 고려될 극수선택에 대해 중점적으로 연구검토한다.

4. 극수에 따른 소음 시뮬레이션 및 검증

종래의 SRM 설계는 전체 체적 내에서 최적의 효율이나 토크를 얻기 위한 극호각이나 극호의 길이 및 요크 두께 등을 설계하였으나, 일반적으로 극수에 따른 소음의 정도는 크게 연구되어 있지 않다. 특히 6/8 SRM은 3상이면서 12/8 SRM과 같은 스트로크 횡수를 가지지만 여타 전동기와 같이 소음정도에 대한 연구보고는 알려져 있지 않다. 본 논문에서는 다른 요소들에 앞서 소음을 고려하여, 최적의 극수를 선택할 수 있도록 시뮬레이션과 실험을 수행하였다.

4.1 극수에 따른 소음 시뮬레이션

표 1은 시뮬레이션 수행을 위한 설계값이다. SRM 구동용 인버터의 전력소자수를 고려하여 3상 전동기가 일반적으로 선택되고, 이 경우 6/4, 6/8, 12/8 극의 3가지 형태가 보편적으로 제안되며, 모두 같은 체적과 출력을 가지도록 설계되었다. 설계된 전동기는 외경, 적층길이, 공극 등 기계적인 치수를 같게 하여 설계하였다.

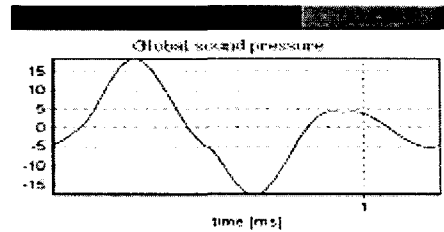
표 1. 설계 전동기의 제원

Table. 1 The specifications of SRM

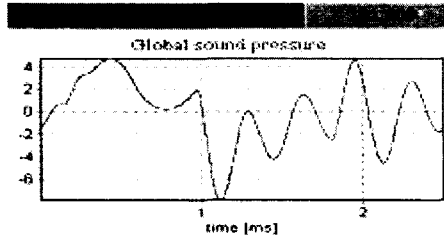
전동기	6/4극		6/8극		12/8극	
	고정자	회전자	고정자	회전자	고정자	회전자
외경(mm)	69	37.75	69	37.75	69	37.75
요크두께(mm)	16	11	14	11	14	11
극호각(deg.)	34	36	22.5	22.5	14	16
극길이(mm)	15	21.75	17	21.75	17	21.75
적층길이(mm)	100					
공극(mm)	0.25					
축직경(mm)	16					
정격전압(V)	72					
정격전류(A)	60					
정격출력(W)	3500		3500		3500	
정격속도(rpm)	6000					

그림 4와 그림 5는 SRM 소음해석 전용프로그램인 PC SRDaS 프로그램[10]으로 6/8, 6/4 및 12/8 SRM에 대하여 시뮬레이션을 수행한 결과이다. 각각의 시뮬레이션은 정격속도 및 정격토크에서 행하였다. 그림 4는 극수 조합에 따른 발생 음압을 측정된 것이며, 그림 5는 발생 음압에 대한 주파수 분석한 것이다.

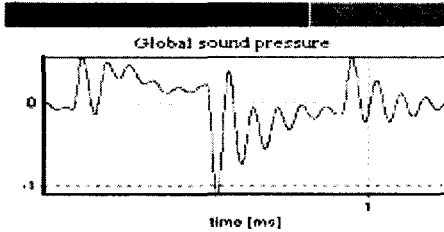
그림 4의 결과로부터 6/8 SRM의 경우 최대 음압의 변화폭은 약 40[dB]이며, 6/4 SRM은 약 13[dB] 그리고 12/8 SRM의 경우는 약 2[dB]로 나타난다. 음압의 변화폭은 소음과 직접 비례 관계가 있는 것으로서, 6/4 SRM의 경우 가장 소음이 크게 되고, 12/8 SRM이 소음이 가장 낮은 것을 알 수 있다.



(a) 6/8 SRM



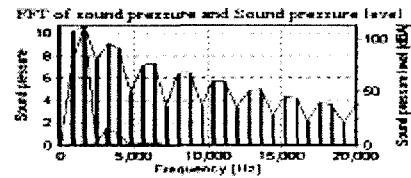
(b) 6/4 SRM



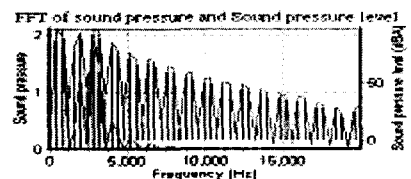
(c) 12/8 SRM

그림 4. SRM의 극수 조합에 따른 음압

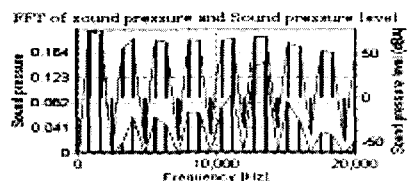
Fig. 4 Global sound pressure for various pole combination of SRM



(a) 6/8 SRM



(b) 6/4 SRM



(c) 12/8 SRM

그림 5. SRM의 극수 조합에 따른 음압 FFT

Fig. 5 Sound pressure FFT for various pole combination of SRM

그림 5는 각 시뮬레이션에서 발생하는 음압을 FFT 변환한 결과이다. 6/8 SRM과 6/4 SRM에서는 인간의 청력에 많이 좌우되는 5[kHz]이하의 주파수에 최대 100[dB]까지 발생하지만, 12/8 SRM의 경우 약 60[dB] 정도로 나타나는 것을 알 수 있다.

피시험 전동기는 모두 동일한 3상이지만, 시뮬레이션 결과로부터 6/8 SRM의 소음이 가장 심하고, 12/8 SRM이 가장 적은 소음을 발생하는 것을 알 수 있다.

동일 체적, 동일 출력은 갖는 3상 SRM을 1상여자 방식으로 운전할 경우, 매상의 여자 시마다 6/8과 6/4 SRM은 진동·소음 발생의 주원인인 방사방향의 흡인력이 회전축을 중심으로 180°로 나누어져 고정자에 가해지지만, 12/8 SRM은 방사방향의 흡인력이 전체 요크에서 각각 90°로 나누어져 방사방향으로 작용하는 힘이 약 1/2로 분산된다. 게다가 각 상에 흐르는 전류는 6/8과 6/4 SRM에 비하여 1/2로 감소되며, 이로부터 진동·소음과 관련된 흡인력은 식 (2)로부터 거의 1/4로 감소한다고 볼 수 있다. 왜냐하면 이들 전동기에서 식 (2)의 공극의 길이 및 인덕턴스의 크기가 일정하다고 하면 흡인력은 각상에 흐르는 전류의 제곱에 비례하기 때문이다. 이렇게 분산된 힘이 고정자에 가해지므로 흡인력에 따른 변화가 크게 감소하여 진동이 작게 되고 결과적으로 소음이 감소하는 것이다.

4.2 실험결과

소음을 측정하고 해석하기 위해 적용된 시작전동기의 측정 시스템은 그림 6에 나타나 있다. 시험전동기의 고정자에서 발생하는 소음특성을 고찰하기 위해 전동기로부터 1m지점에 소음계를 설치하였다. 시험을 위한 구동은 클래식 인버터를 사용하였다.

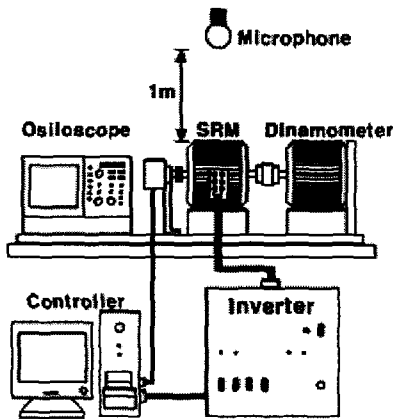


그림 6. 진동·소음 측정 시스템의 구성
Fig. 6 Test set-up for vibration and noise measurement

그림 7은 시뮬레이션 결과를 검증하기 위해 전동기를 시험하기 위한 장치이다. 전문적인 소음측정실이 아니므로 소음의 절대적인 양보다 두 전동기의 상대적인 소음만을 측정 및 비교가 가능하였다. 또한 6/8 극이 시뮬레이션에서 이미 가장 큰 소음을 발생하는 것으로 확인되었기 때문에 측정에서는 제외하였고, 6/4와 12/8 극의 두 전동기만을 시험하였다. 두

전동기는 모두 동일 체적과 동일 출력을 갖도록 설계, 제작된 것이다.

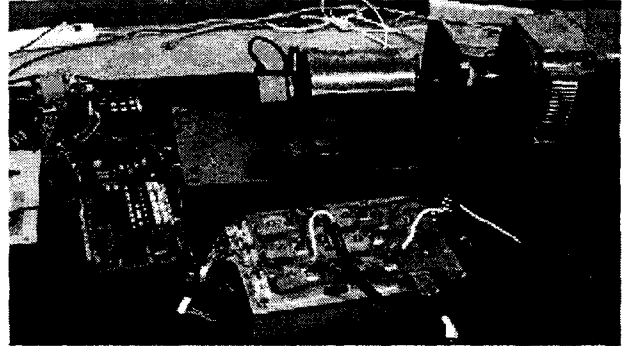
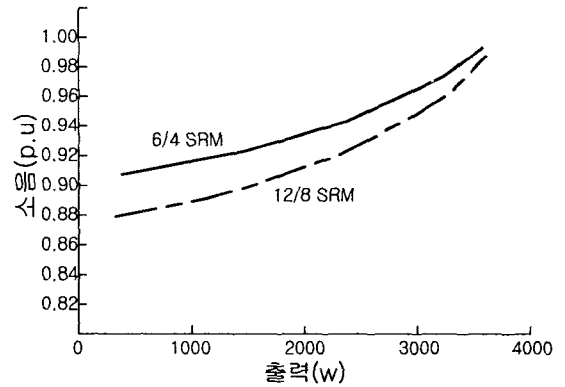
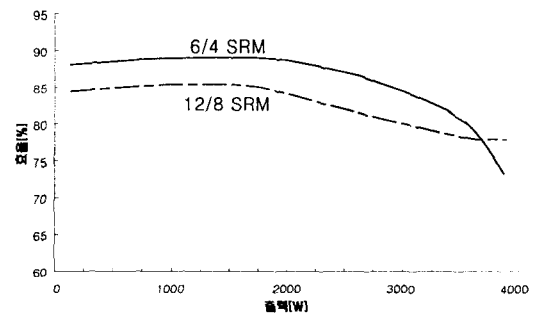


그림 7. 시험장치도
Fig. 7 Test setup



(a)



(b)

그림 8. 6/4와 12/8 SRM의 소음 및 효율특성
(a) 소음특성(b) 효율특성

Fig. 8 Noise and efficiency characteristics of 6/4 and 12/8 SRM

(a) Noise characteristics (b) Efficiency characteristics

그림 8은 두 전동기의 소음 및 효율 측정결과이다. 그래프에서 보듯이 전 출력범위에 걸쳐 12/8 극이 6/4 극에 비하여 소음레벨이 낮게 측정되었으며, 이는 시뮬레이션 결과와도 잘 일치하고 있음이 확인된다. 그러나 운전효율 면에서는 6/4전동기가 다소 우수한 것으로 평가되었다.

5. 결 론

본 논문에서는 SRM의 소음 발생원인을 분석하고, 동일 체적 및 동일 출력의 SRM에서 고정자와 회전자 극수 조합에 따른 소음 크기의 변동을 시뮬레이션과 실험을 통하여 확인하였다. 효율과 토크 등에 앞서 소음을 고려한 SRM의 극수 조합을 선정하기 위해 시뮬레이션을 수행하였다. 시뮬레이션은 음압과 FFT결과를 통해서 소음을 정량적인 그래프로 나타내었다.

수행된 결과는 6/8 > 6/4 > 12/8 극의 순으로 소음이 크게 나타나는 것이 확인되었다. 이를 통해 그 동안 그다지 알려져 있지 않았던 6/8 SRM의 소음정도 및 6/4와 12/8 극의 상대적 소음정도를 알 수 있었고, 시뮬레이션 결과와 실제 전동기 소음 측정도 결과도 잘 일치하는 것을 알 수 있었다.

전동기 구동용 인버터의 스위치 숫자를 일정하게 할 경우 SRM의 상수는 일정하게 하여야 하므로, 본 논문의 결과로부터 고정자의 자극수를 늘릴수록 소음이 더욱 감소할 것으로 기대가 된다. 그러나 3상 전동기인 경우 고정자 자극수는 6, 12, 18 극 등의 형태로 늘려가야 하고, 이는 실제 소형전동기의 경우 제작과 관련된 어려움이 있으며, 효율측면 등을 고려하여 적절한 선택을 필요로 한다.

본 논문은 1상여자를 기준으로 검토하였으나, 차후 2상여자 등 여자 및 권선방식을 고려한 연구가 계속 수행되어야 할 것이다.

감사의 글

본 연구는 산업자원부 지원에 의하여 기초전력공학 공동연구소주관(과제번호:R2003-B-097) 주관으로 수행된 과제임.

참 고 문 헌

[1] Jawad Faiz and John W.Finch ; "Aspects of Design Optimization for Switched Reluctance Motors," IEEE Trans. on EC. Vol.8, No.4, pp.704-713, 1993

[2] R.C. Becrra, M. Ehsani, and T.J.E. Miller; "Commutation of SR Motors", IEEE Trans. on PE, Vol.8, No. 3, July 1993

[3] Chi-Yao Wu, Charles Pollock ; "Analysis and Reduction of Vibration and Acoustic Noise in the Switched Reluctance Drive," IEEE Trans. on IA, Vol.31, No.1, pp.91-98, 1995

[4] Derrick E. Cameron, Jeffrey H.Lang and stephen D. Umans ; "The Origin and Reduction of Acoustic Noise in Doubly Salient Variable-Reluctance Motors," IEEE Trans, on IA, Vol.28, No.6, pp.1250-1255, 1992.

[5] D.E.Cameron, J.H.Lang, S.D.Umans ; "The Origin of Acoustic Noise in Variable Reluctance Motors", IEEE IAS Annual Meeting, San diego, California, pp. 108-115, 1989.

[6] C.Pollock, C.Y.Wu, "Analysis Noise Reduction of Acoustic Noise in the Switched Reluctance Drive", IEEE Trans. on IA, Vol.31, No.1, pp.91-98, 1995.

[7] C.Pollock, C.Y.Wu, "Acoustic Noise Cancellation Techniques for Switched Reluctance Drives", IEEE IAS. Annual Meeting, Vol.1, pp.448-455, 1995.

[8] R.S.colby, F.M.Mottier, T.J.E.Miller, "Vibration Modes and Acoustic Noise in a Four-Phase Switched Reluctance Motor", IEEE trans. on IA, Vol.32, No.6, pp.1357-1364, 1996.

[9] Jae-Won, Seok-Gyu Oh, Jin-Woo Ahn, "An Analysis of Noise Characteristics According to the Excitation Method of SRM", the Trans. of the KIEE, Vol.49B, No.9, pp. 565-571, 2000.

[10] P.O. Rasmussen, "Design and Advanced Control of Switched Reluctance Motors", Ph.D Thesis, Aalborg Univ. pp.237-255, 2002.

[11] 안진우. 스위치드 릴럭턴스 전동기 구동과 응용, 오성 미디어, 2001

[12] 안진우, 강유정, "SRM의 4상한 구동을 위한 전류제한방식" 전력전자학회 논문지 8권3호, pp.285-291, 2003. 6

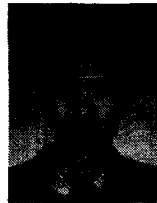
저 자 소 개

안 진 우(安珍雨)



1958년생. 1984년 부산대 전기공학과 졸업. 1986년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1992년 동 대학원 전기공학과 졸업(박사). 1995년 12월~1996년 2월 영국 글래스고우대 방문연구원. 1998년 8월~1999년 8월 미국 위스콘신대 방문교수. 1992년~현재 경성대 전기전자컴퓨터공학부 교수. 당 학회 편집이사.

이 동 희(李東熙)



1970년생. 1996년 부산대 전기공학과 졸업. 1998년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 2001년 동 대학원 전기공학과 졸업(박사). 2001~2002 경성대 Post Doc. 현재 OTIS-LG 선임연구원

안 영 주(安永株)



1957년 1월 22일생. 1986년 부산공업대학 전기공학과 졸업, 1995년 부산대학교 전기공학과(공박), 현재 부경대학교 공대 전기·제어계측공학부 조교수