

SRM 제어방법들에 대한 적응관측기들의 분석

신재화
시립인천전문대학

Study on the analysis Adaptive Observers to Control SRM Control Meethod

Shin Jae Hwa
Inchon City College

Abstract - MRAS observer, which is based on adaptive control theory, estimates speed and position by using optimal observer gains on the basis of Lyapunov stability theory. However, in case of MRAS theory, position estimation error is in existence because of non-linearity for inductance variation and limit cycles for position estimation.

The adaptive sliding observer based on the variable structure control theory estimates the speed and position for zero of estimation error by using the sliding surface equal to the error between speed and position estimation. The binary observer estimates the rotor speed and rotor flux with alleviation of the high-frequency chattering, and retains the benefits achieved in the conventional sliding observer, such as robustness to parameter and disturbance variations. The speed and position sensorless control of SRM under the load and inductance variation is verified by the experimental results.

1. 서 론

적응제어이론을 기초로 한 MRAS 관측기는 인덕턴스 변동에 의한 비선형성을 완전하게 극복하지 못하고, 위치 추정에 있어서 리미트 사이클(Limit Cycle)을 형성하여 추정오차가 존재하게 된다.

가변구조 제어이론에 기초한 적응 슬라이딩모드 관측기는 적응 동일차원 관측기와 동일하게 슬라이딩 초평면을 속도 및 위치 추정오차로 설정하여 오차가 '0'으로 수렴하기 위한 조건을 제시하고, 속도 및 위치를 추정하였다. 이원관측기는 파라미터의 변동 및 외란에 대한 강인한 슬라이딩 관측기의 장점을 그대로 유지하면서 채터링 저감을 동시에 성취할 수 있게 되었으며, 인덕턴스 변동 및 부하가 변동하는 상태에서도 속도 및 위치 추정이 우수함을 실험을 통하여 확인하였다.

2. SRM의 속도 제어 방법

2.1 각도 제어(Angle Control)

그림 1은 회전자의 위치각에 따른 인덕턴스 프로파일과 고정자 상의 스위칭에 의한 여자전류의 파형이다[1,2].

2.1.1 진상각(Advance Angle) 제어법

토크 발생구간에서는 가변부하에 따라서 평활한 전류의 확립을 위해 진상각(또는 도전각이라고 함)을 조정하는 제어법이다.

그림 1에는 단일 펄스 전류에 의해 제어되는 경우의 파형을 나타내었다. 여기서 인가전압의 턴오프각(θ_o)은 비정렬 위치에 있으며, 전류의 크기는 극들이 겹치기 시작하는 시점(θ_{min})까지는 선형적으로 증가한다.

고속 또는 중부하시에는 필요한 충분한 토크를 얻기 위해서 [그림 1]에 나타난 것과 같이 진상각(Advance Angle : θ_{ad})과 드웰각(Dwell Angle : θ_{dw})을 조절하는 방법을 사용한다. 급제동을 하고자 할 때에는 각도제어를 사용하면 더욱 효과적이다. 그러므로 인덕턴스의 감소하는 구간 이전에 전류를 완전히 소호되도록 해야 하며 부의 전압이 자속을 0으로 만드는 각을 전류 소호각(θ_q : Current Extinction Angle)이라 한다[3].

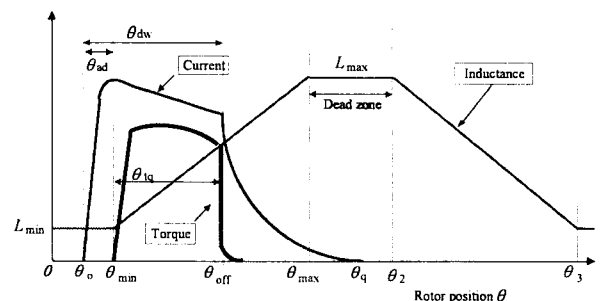


그림 1. 인덕턴스 프로파일과 상전류

2.1.2 스위치-오프각 제어법

가변부하에 따라서 만드는 진상각도를 제어함과 동시에 효율향상을 위한 턴 오프각 (θ_{off})의 적정제어가 필요하다. 턴 오프각의 제어는 유효토크 발생구간인 $\theta_{min} \sim \theta_{off}$ 사이의 각도 크기인 토크각($\theta_{tq} = \theta_{min} \sim \theta_{off}$)을 일정하게 하는 제어와 스위치가 도통되어 있는 동안의 각도 크기인 드웰각($\theta_{dw} = \theta_o \sim \theta_{off}$)을 일정하게 하는 두 종류의 제어가 가능하다.

2.2 실험장치 및 방법

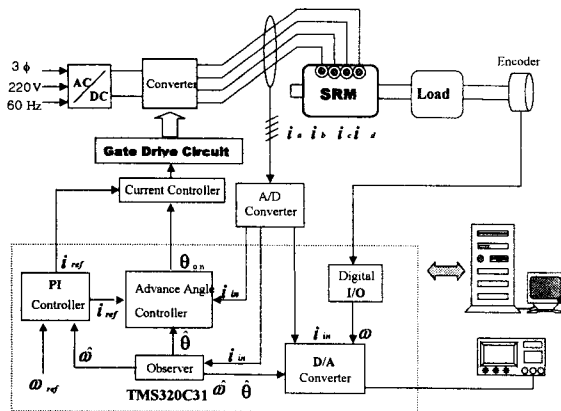


그림 2. 실험 장치도

전체 시스템 블록도를 그림 2에 나타내었다. PI 제어부에서는 지령속도와 관측기에서 추정된 속도와의 오차를 비례-적분하여 실제속도가 지령속도로 추종할 수 있도록 제어를 행한다.

진상각 제어부는 관측기의 추정결과인 추정속도($\hat{\omega}$), 추정위치($\hat{\theta}$)와 실제전류(i_n) 그리고, PI제어기를 통한 지령전류(i_{ref})를 사용하여 최적의 진상각을 계산한다. 연산 결과를 PWM 제어부에 출력한다. 전류 제어부는 PWM 전류 제어로서 히스테리시스 전류제어를 실시하여 지령전류에 실제전류가 정확하게 추종할 수 있도록 하였다.

그림 2의 점선 부분은 DSP를 사용하여 구현하였고, 샘플링 시간(Sampling time)은 100[μ sec]이다. 실제 속도를 추정 속도와 비교하고, 실제위치와 추정위치를 비교하기 위하여 디지털 I/O 포트 (Digital I/O port), A/D 컨버터, 그리고 D/A 컨버터를 사용하였다. 샘플링 시간 중 80[μ sec]가 관측기의 속도 및 위치를 추정하는데 소요되고 있다.

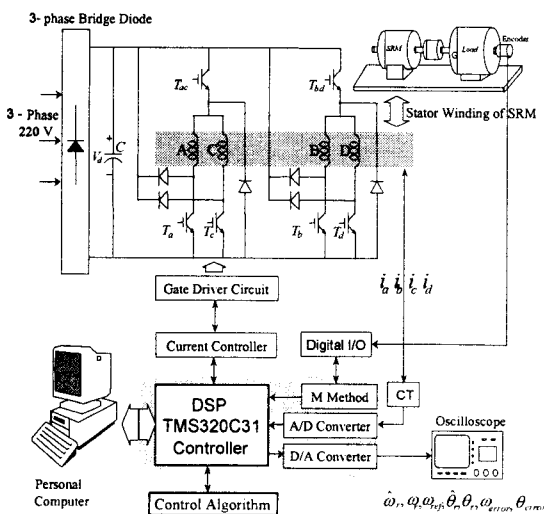


그림 3. 제안된 전체 하드웨어 시스템

2.3 실험결과

2.3.1. MRAS관측기로 SRM을 제어

그림 4는 A상 인덕턴스 및 A, C상 전류를 보이고 있다. 일정 토크를 성취하기 위하여, 히스테리시스 전류 제어법을 통한 전류제어도 잘 이루어지고 있음을 확인할 수 있다.

그림 5는 지령속도 1,000[rpm]에 대한 실제속도, 추정속도, 추정오차를 보이고 있다. 정상 상태에서 추정오차는 거의 '0'으로 수렴된다.

그림 6은 2,000[rpm]에서의 A상 인덕턴스와 A, C상 전류를 보이고 있다.

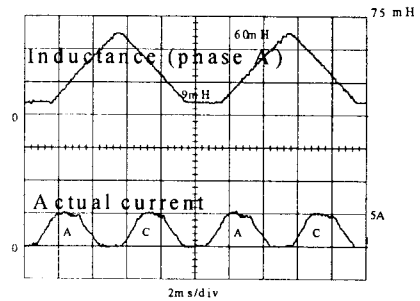


그림 4. 1,000[rpm]지령시 A상 인덕턴스 및 A, C상 전류

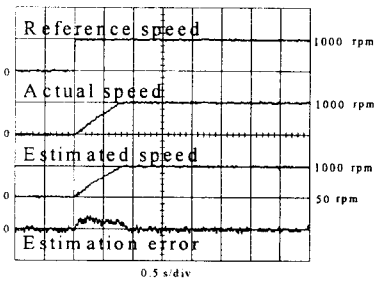


그림 5. 1,000[rpm] 지령시 지령속도, 실제속도, 추정속도, 추정오차

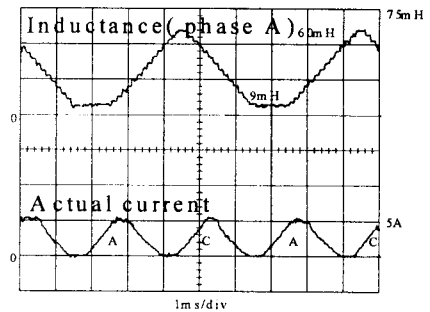


그림 6. 2,000[rpm]에서의 A상 인덕턴스 및 A, C상 전류

2.3.2 적응 슬라이딩모드 관측기로 SRM을 제어

[그림 7]은 제안된 알고리즘을 사용하여 1,000 [rpm]으로 구동하였을 때의 A, C상과 B, D상의 상전류 파형을 보여주고 있다.

그림 8은 1,000[rpm]지령시 지령속도, 실제속도, 추정속도, 실제전류를 나타내고 있다. 최대전류를 상승시키면 더 짧은 시간에 정상상태로 수속할 수 있으나 SRM의 정격전류인 5[A]의 160[%]정도를 최대로 하여 최대전류를 결정하였다.

그림 9는 1,000[rpm]지령시 실제속도와 추정속도, 추정오차를 보이고 있다. 추정속도가 실제속도보다 좀 더 빠르게 상승하고 있는데 이것은 속도 추정기 자체가 관성항을 포함하고 있지 않으므로 빠른 상승을 보인 것이다.

그림 10은 A상 인덕턴스와 A상 및 C상 전류를 보이고 있다. 인덕턴스가 상승하는 점에서 진상각을 결정하였다.

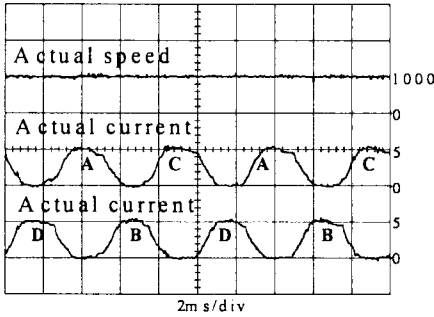


그림 7. 1,000[rpm]에서의 실제속도 및 A, C상과 B, D상의 실제전류

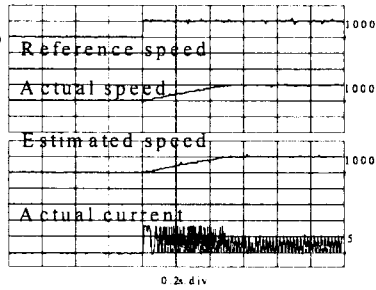


그림 8. 1,000[rpm]일 때 지령속도, 실제속도, 추정속도, 실제전류(B상)

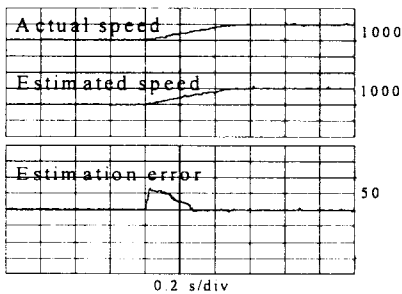


그림 9. 1,000[rpm]일 때 실제속도, 추정속도, 추정오차

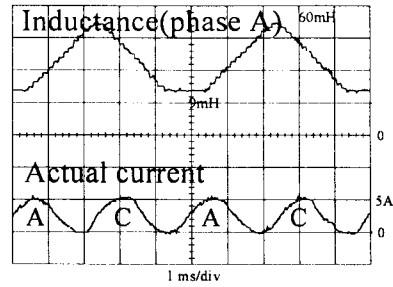


그림 10. 2,000[rpm]에서의 A상 인덕턴스와 A, C상 전류

2.3.3 이원관측기로 SRM을 제어

그림 11은 제안된 알고리즘을 사용하여 1,000[rpm]으로 구동하였을 때의 A, C상과 B, D상의 상전류 파형을 보여주고 있다. 그림에서 전류는 평활한 토크를 얻을 수 있는 안정된 전류형태를 보이고 있다.

그림 12는 이원관측기를 이용한 속도응답특성을 보여주고 있다. 속도 지령치를 1,000[rpm]으로 하였을 때의 지령속도, 실제속도, 추정속도, B상 실제전류 파형이다. 오버슈트의 발생은 채터링을 줄이기 위해 적용된 관측기의 이원 제어 되먹임 함수에 의한 것임을 볼 수 있다. 정상 상태에서 속도 및 전류가 안정하게 동작하고 있음을 볼 수 있다.

그림 13은 1,000[rpm] 구동시 추정오차 파형을 보여주고 있다. 전류오차 신호의 채터링을 개선하기 위하여 이원 제어기가 적용된 이원관측기의 추정오차는 과도상태에서는 약 6.5[%] 보다 작은 범위를 가지고 있다.

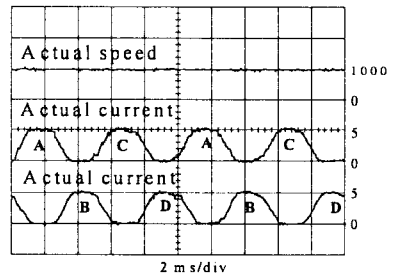


그림 11. 1,000[rpm]지령시 이원관측기의 실제속도 및 A, B, C, D상의 실제전류

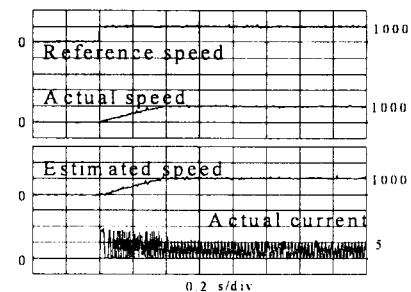


그림 12. 1,000[rpm]지령속도, 실제속도, 추정속도, 실제전류(B상)

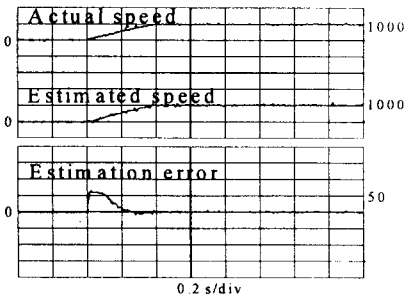


그림 13. 1,000[rpm] 지령시 이원관측기의 실제 속도, 추정속도, 속도추정오차

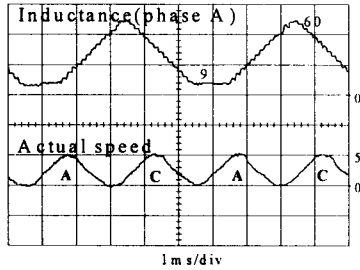


그림 14. 2,000[rpm]지령시 A상 인덕턴스와 A/C상 전류

그림 14는 2,000[rpm]에서 A상 인덕턴스와 A, C상의 전류를 보이고 있다. 인덕턴스 하강점에서는 상전류가 이미 영(0)인 상태이므로 부(-)토크가 발생하지 않는 상태로 운전되도록 턴오프 진상각이 결정되었다.

2.4 제안된 관측기들의 비교 및 검토

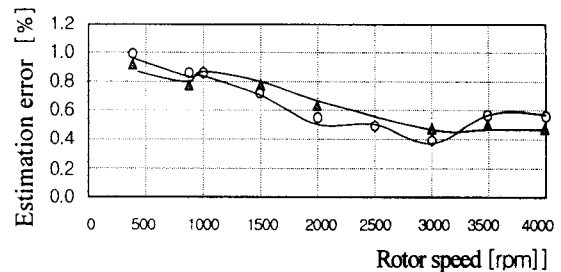
표 1. 관측기들의 비교 및 검토

속도에 따른 비교항목	관측기	MRAS Observer		Adaptive Sliding Mode Observer		Binary Observer	
		비교치	그림	비교치	그림	비교치	그림
1,000 [rpm]	턴온 진상각	4'	4	4'	7	4'	11
	턴오프 진상각	7'		10'		7'	
	드웰각	20.5'		17.5'		20.5'	
	과도 상태	정상 상태에 도달 시간	0.8초	5	0.5초	8	0.3초
	추정 오차	2[%]	7[%]		9	6.5[%]	13
	정상 상태 오차	0.1[%]		약1[%]	9	약1[%]	13
2,000 [rpm]	턴온 진상각	6'	6	8'	10	7'	14
	턴오프 진상각	14'		12'		13'	
	드웰각	15.5'		19.5'		17.5'	

표 1에 각 관측기의 성능을 나타내었다. 각 관측기는 현저하게 차이를 들어내지는 않고 있으나, 추정속도의 채터링 현상에 있어서는 약간의 차이를 보이고 있다. 슬라이딩의 경우 그 정도가 상대적으로 크게 나타내고 있고, 이원관측기의 경우 가장 작게 나타나고 있다.

표 2. 각 관측기의 실험결과 총괄

종류	MRAS 관측기	슬라이딩 관측기	이원 관측기
속도 추정오차	1. 속도추정 오차 5%이내		
속도 추종성능	2. 전류 추정 성능 확보		
전류 추정성능	3. 속도 추종 성능확보		
과도 응답성능	조건		
	1.속도: 1,000[rpm]		
	2.부하: 0.8 N.m		
	0.8 초	0.5초	0.3초
추정 속도 채터링 현상	지령속도에 대해 4%	지령속도에 대해 5%	지령속도에 대해 3%
토크 리플정도	±20%	±25%	±20%
위치 추정성능	오차 1.6%(1)	오차 3.3%(2)	오차 3.3%(2)
비 고	1.속도추정 및 추정성능은 모두 양호. 2.슬라이딩관측기와 MRAS관측기는 추정 속도 채터링 현상 발생. 3.이원관측기는 속도 및 전류 채터링 억압.		



▲- adaptive sliding mode observer

○- binary observer

그림 15. 이원관측기 및 슬라이딩모드 관측기의 속도 특성

그림 15는 이원 제어기 및 적응 슬라이딩모드 제어기의 속도 특성을 보여주고 있다. 두 제어기 모두 절대 추정 오차가 유사한 제어 특성을 보여 주고 있다. 그러나 실제 파형에서는 절대치로 볼 때는 유사하나, 적응 슬라이딩모드 관측기의 경우가 추정오차의 채터링 진폭 및 크기가 큰 것을 알 수 있다. 이원관측기의 경우 저속영역에서는 약 1[%]의 추정오차를 가지나, 고속으로 갈수록 속도오차 범위가 0.6[%] 이하로 줄어들고 있음을 알 수 있으며, 넓은 속도 영역에서 양호한 속도성능을 볼 수 있었다.

3. 결 론

적용제어이론을 기초로 한 MRAS를 이용한 관측기는 Lyapunov 안정도 해석법을 기초로 한 안정도 해석을 통하여, 관측기 이득을 설정하고 속도 및 위치를 추정하였다. 가변구조 제어이론에 기초한 적응 슬라이딩모드 관측기는 오버슈트 없이 파라미터 및 외란의 변동에 견실한 특징을 가지고 있으며, 슬라이딩 초평면을 속도 및 위치 추정오차로 설정하여 오차가 '0'으로 수렴하기 위한 조건을 제시하고, 이를 이용하여 속도 및 위치를 추정하였다. 그러나 이상적인 구현을 위해 선정된 불연속적인 제어입력 때문에 높은 주파수의 채터링으로 추정성능이 저하되고, 기계적인 진동을 일으키는 단점을 가지고 있다.

적용 슬라이딩모드 관측기의 채터링 현상을 저감하며, 스위칭 주파수의 한계, 제어지연 등이 존재해도 연속적인 제어입력을 생성할 수 있는 이원제어기를 기초로 하여 새로운 이원관측기를 설계하였다. 특히 저속영역에서 기존의 적응 슬라이딩모드 관측기의 장점을 유지하면서 채터링이 저감된 회전속도 및 회전자속 추정치를 얻을 수 있었다. 그러나 고속에서는 회전자의 위치가 샘플시간(130[μ s])동안 약 4.5°(2,500[rpm]에서)정도 진행하게 된다. 그러므로 넓은 속도영역에서 속도를 제어하기 위해서는 채터링 현상과 외란 및 파라미터 변동에 대한 강인성을 유지하는 문제를 적절히 타협하는 것이 중요하며, 이를 위한 연구가 추후 필요하리라고 사료된다.

[참 고 문 헌]

- [1] Krishnan Ramu, 'Switched Reluctance Motor Drives', Virginia Polytechnic Institute and University, 1996.
- [2] 안진우, 황영문, '스위치드 릴럭턴스 전동기 구동과 응용', 신지서원, 1998.
- [3] J. R. Frus and B. C. Kuo, 'Closed-Loop Control of Step Motors without Feedback Encoders', Proc. of Fifth Annual Symp. on Incremental Motion Control System and Devices, pp.CCI-CCII, 1976. 5.