전력전자학술대회 논문집 2004. 7.12 ~ 7.15

Modified Anti-windup PI 제어기와 Braking Mode를 이용한 SRM의 속도제어

김재문*, 윤용호**, 장수진**, 원충연**, 김영렬***
한국철도대학*, 성균관대학교**, 안양대학교***

Speed Control of Switched Reluctance Motor using Modified Anti-Windup PI Controller and Braking Mode

J.M. Kim*, Y.H. Yoon**, S.J. Jang**, C.Y. Won**, and Y.R. Kim***
Korea National Railroad College*, Sungkyunkwan University**, Anyang University***

ABSTRACT

본 논문은 부하에 대한 빠른 응답특성을 보이는 새로운 토폴로지를 제안하였다. PI제어기 출력이 포화될 때 windup 현상이 나타나고 그 결과로 성능이 저하된다. 따라서 전동기의 가변속 제어성능을 위해 가속시에는 개선된 Anti-windup PI제어기만을 사용하고, 감속시에는 추가로 부하의 특성을 고려하여 braking 동작을 사용하였다. 시뮬레이션 및 실험결과는 속도성능면에서 제안된 방식이 종래의 다른 제어방식에 비해 우수함을 보여 준다

1. 서 론

간단한 기계적 구조특성으로 SRM은 견고하고 제작비가 저렴하며, 브러시 등이 없어 유지비가 거의 들지 않는 장점이 있다. 또한 상 여자를 위해 펄스형 전압을 사용하여 각도제어를 하게 되면 초고속 운전이 용이하고, 단위 체적당 토오크 및 효율 면에서 유도전동기보다 우수하다는 것이 나타나 있다[1]. 그러나 릴럭턴스와 상당 불연속적인 펄스 전류를 이용하여 토오크를 발생하는 특징으로 인해 타전동기에 비해 상대적으로 토오크 맥동이 크며, 진동 및 소음이 많이 발생한다.

SRM에 대한 최근의 연구경향을 살펴보면, 주로 토오크 맥동을 저감하여 진동 및 소음을 줄이고자 하는 연구와 가변속 제어 구현에 대한 응답 특성에 많은 연구가 이루어지고 있다[2-4]. 특히 가변속 제어를 위한 기법들은 일반적인 PI 제어기를 비롯하여 현대 제어이론을 적용한 연구결과 논문이 많이 발표되고 있다.

본 논문은 SRM의 가변속 제어시에 과도상태에서 양호한 응답특성을 얻고자 SRM의 구조적 특성을 이용한 제어알고리즘을 제안한다. 즉 가속시에는 일반적인 Anti-windup을 보완한 개선된 Anti-windup PI 제어기만을 사용하고, 감속시에는 추가로 braking 모드 동작을 사용한다. 실험에 사용된 전동기는 고정자 극수가 6개, 회전자 극수가 4개인 250W급 SRM을 사용하였다. 또한 디지털 제어 및 시스템 구현의 용이성을 위해 80c196kc 마이크로 컨트롤러와 다양한 제어 방법을 적용할 수 있는 비대칭 브리지 컨버터를 사용하였다.

2. SRM의 구조 및 동작 원리

2.1 이론적 고찰

SRM은 고정자와 회전자가 돌극(pole)의 구조를 갖는 이중 돌극형 구조이고, 회전자는 적층된 규소강판으로 견고하며, 고정자는 마주보는 두 극이 같은 방향의 자속을 발생시킬 수 있도록 권선이 직렬 또는 병렬로 간단하게 감겨져 있다.

그림 1은 본 논문에서 사용된 고정자 극수 6개, 회전자 극수 4개인 6/4극 SRM의 단면도이다.

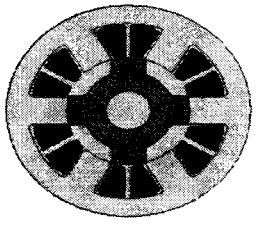

그림 1 6/4극 SRM의 구조
Fig. 1 The Structure of 6/4 pole SRM

고정자 권선을 여자시킬 때 가장 가까운 회전자 극이 자기저항이 최소가 되도록 순차적으로 스위칭하면 회전자는 지속적으로 회전하게 된다. 따라서 고정자의 여자순서에 따라 정·역의 회전방향이 결정된다[5].

2.2 SRM의 정·역 운전 및 braking 동작

상기에서 언급하였듯이 그림 2는 회전 방향에 따른 스위칭 순서를 나타낸다. 정방향 운전시 θ가 증가함에 따라 각 상의 인덕턴스가 증가하는 구간에서 스위칭을 해주게 되면 정토오크가 발생하게 되고, 감소하는 구간에서 순차적으로 스위칭을 하게 되면 역토오크가 연속적으로 작용하게 된다. 또한 역방향 운전시에도 같은 방법으로 스위칭 순서를 정할 수 있게 된다[6]. 그림 2와 같이 braking 동작 스위칭을 할 경우 제어 신호는 신속하게 모드를 바꿀 수 있도록 구성되어야 한다. 그림 3와 그림 4, 5는 motoring mode와 braking mode에 대해 전류 파형을 도식화하였다.

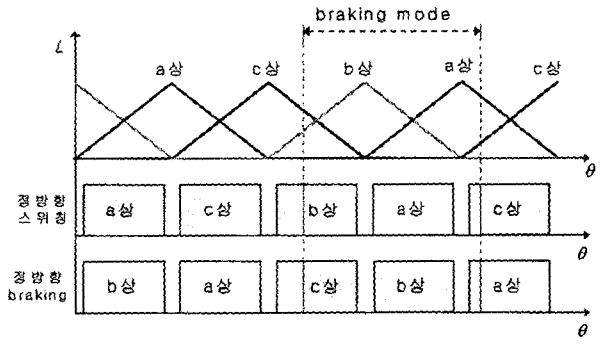

그림 2 인덕턴스에 따른 여자상 순서
Fig. 2 Sequence of motoring and braking mode

정방향 스위칭 순서 : a ⇨ c ⇨ b ⇨ a ⇨ c
정방향 braking : b ⇨ a ⇨ c ⇨ b ⇨ a

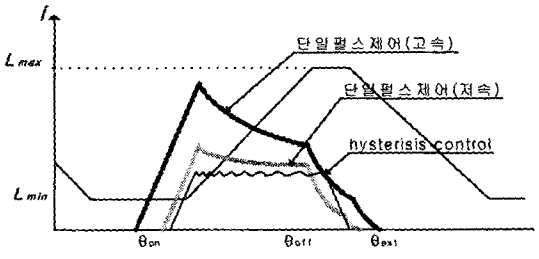

그림 3 전동기 모드시 전류 파형
Fig. 3 Current waveform for motoring mode

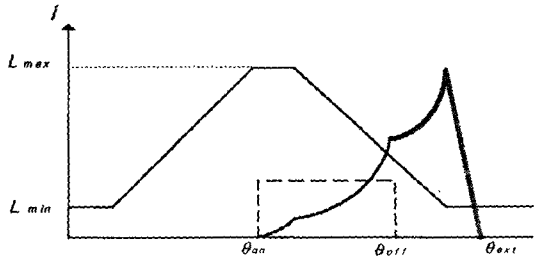

그림 4 braking 모드 동작시 전류 파형(고속)
Fig. 4 Current waveform for braking mode(high speed)

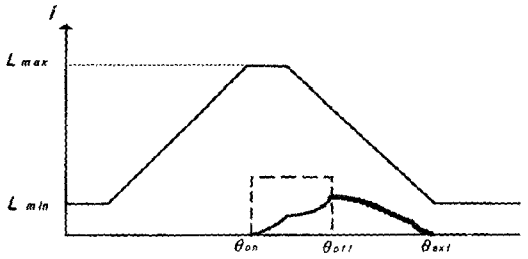

그림 5 braking 동작시 전류 파형(저속)
Fig. 5 Current waveform for braking mode(low speed)

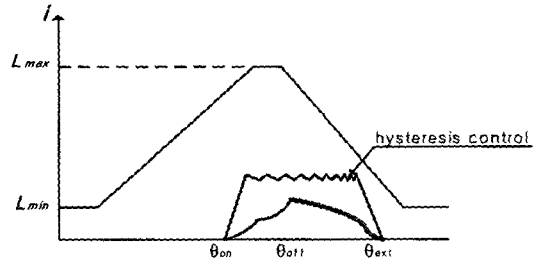

그림 6 braking 모드시 히스테리시스 제어에 의한 전류
Fig. 6 Current when controlled by hysteresis current control for braking mode

그림 4와 5는 소호각에 따른 발전전류 파형으로 충분한 여자 전류를 공급받은 경우와 그렇지 않은 경우 회생되는 전류량을 알 수 있다. 즉 발전되는 전류량은 소호각으로부터 결정되는 것을 알 수 있다.

일반적으로 braking 동작은 제어를 간단히 하기 위해 일정각 도통제어를 하게 되는데, 이런 경우 고속에서는 그림 4와 같이 발전되는 전류가 커 꼬리 전류의 피크값이 너무 커지고 저속에서는 작아져 전류에 의한 리플이 발생하게 된다. 본 논문에서는 braking 동작동안 히스테리시스 전류 제어가 이뤄지도록 하여 그림 6과 같이 전류에 의한 리플을 감소시키는 방법을 적용하였다.

3. Anti-windup PI 제어기 설계

제어시스템이 동작해야 할 영역이 광범위한 경우 제어변수가 시스템의 제한값에 다다를 수 있다. 이런 경우 windup 현상이 발생하게 되어 그 결과 제어량이 포화되면서 제어기의 과도 상태가 길어지게 되고 응답에 큰 오버슈트나 진동이 야기된다. 따라서 제어기에 제한값이 존재하는 시스템의 고성능제어를 위해 PI제어기의 적분기 windup 현상을 막기 위한 Anti-windup 기법이 요구된다[7].

그림 7은 본 논문에서 제안한 SRM에 적용한 개선된 Anti-windup PI 제어기 구성도를 보여준다

일반적인 Anti-windup PI 제어기와 비교하면, PI 제어기 출력과 실제 측정된 Actuator 출력을 비교하여 제어기가 포화되고 있는지를 판단한다.

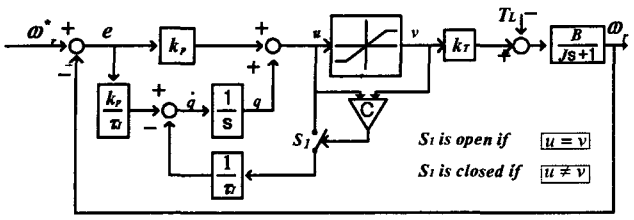

그림 7 Modified Anti-windup PI 제어기 구성
Fig. 7 Block diagram of anti-windup PI controller

u와 v값이 같으면 S_1은 개방되어 일반적인 PI제어기와 같은 동작을 하게 되고, 두 값이 다르면 S_1이 닫혀서 u값이 Anti-windup 제어기 입력으로 들어간다.

시스템 입력 v가 포화형태의 비선형성에 의해 식 (1)과 같이 제한된다고 가정하면,

$$v = \begin{cases} u, & \text{if } |u| \le U_m \\ U_m \cdot sgn(u), & \text{if } |u| > U_m \end{cases} \quad (1)$$

따라서 PI 속도제어기의 출력 u는 식 (2)와 같이 표현된다.

$$u = k_p e + q \quad (2)$$

여기서 $e = w_r^* - w_r$, q는 적분 상태변수이다.

만일 기준속도가 크게 바뀌거나 부하가 크게 걸렸을 때 PI 제어기의 출력 u는 포화된다. 또한 $\dot{q}$는 제어기가 포화되었을 때와 그렇지 않을 경우에 대해 표현하면 식 (3)과 같다.

$$\dot{q} = \begin{cases} \frac{k_p}{\tau_I} e & \text{if } u = v \\ \frac{k_p}{\tau_I} e - \frac{1}{\tau_I} u & \text{if } u \neq v \end{cases} \quad (3)$$

식 (3)에서 제어기가 포화($u \neq v$)되었을 경우의 식을 식 (2)에 대입하여 정리하면 식 (4)와 같이 표현되고 이것에 대해 미분 방정식을 풀면 식 (5)와 같다.

$$\dot{q} = -\frac{1}{\tau_I} q \quad (4)$$

$$q = q_0 e^{-\frac{1}{\tau_I} t} \quad (5)$$

여기서 q_0는 제어기가 포화되는 시점의 적분 초기값이다. 즉, 적분기가 포화되었을 때 적분기 출력 q는 적분시간 τ_I 값에 의해 결정되며, τ_I 값이 작을수록 제어기가 포화 되었을 때 q가 zero 값으로 빠르게 수렴하여 제어기 출력을 선형영역에서 동작하도록 한다.

4. 시뮬레이션

본 논문은 전력변환회로를 설계하고 해석하는 시뮬레이션 소프트웨어인 Psim을 사용하여 비대칭 브리지 컨버터에 의해 구동되는 SRM에 대해 시뮬레이션을 하였다. 표 1은 시뮬레이션에 사용된 모터 상수값이다.

표 1 시뮬레이션에 사용된 모터상수
Table 1 Used motor parameter at simulation

상 수	3 [상]
출 력	250 [W]
고정자 속도	6 [극]
회전자 극수	4 [극]
권선 저항	0.021 [Ω/상]
최대 인덕턴스	1.332 [mH]
최소 인덕턴스	0.241 [mH]
고정자 극호(βs)	30°
회전자 극호(βr)	32°

그림 8은 가변속 제어를 했을 때 일반적인 PI제어기에 대한 속도, 상전류 및 기준전류 파형을 보여준다. 가속시(0rpm ⇨1000rpm)는 약간의 오버슈트가 발생하면서 정정상태에 도달하였으며, 감속시(1000rpm ⇨ 500rpm)는 부하관성으로 인해 오버슈트가 크고 정정상태에 도달하는 시간이 매우 느리다. 그림 9는 Modified Anti-windup PI 제어기를 사용한 경우로 그림 8과 비교하면 감속시(1000rpm ⇨ 500rpm)에는 응답특성이 매우 양호함을 알 수 있다. 이것은 적분기가 포화되는 시간동안 Anti-windup 제어기에 의해 적분기가 포화되는 것을 방지했기 때문이다.

그림 10은 본 논문에서 제안한 modified Anti-windup PI제어기에 braking 모드를 추가한 결과파형이다. 가속시에는 그림 9와 유사한 응답특성을 얻을 수 있고, 감속시에는 상당히 양호한 속도응답을 얻는다. 이것은 가속시에는 동일한 제어기를 사용하지만 감속시에는 추가로 braking 모드 동작을 하기 때문이다. 그림 8- 그림 10에서 보면, 감속하는 구간에서 braking 동작하는 동안 제어됨을 알 수 있다.

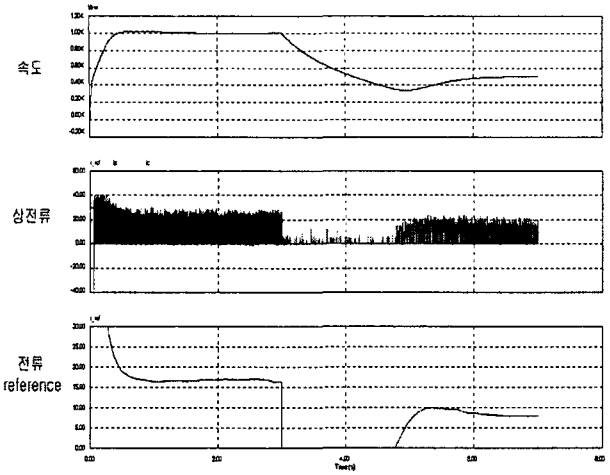

그림 8 일반적인 PI 제어기를 사용한 경우
Fig. 8 In case of conventional PI control

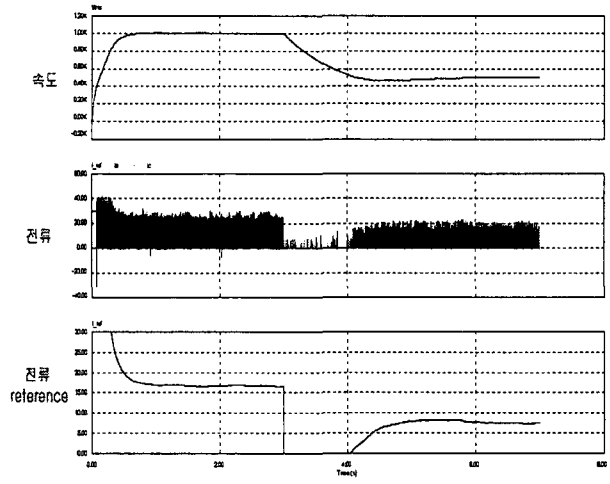

그림 9 Modified Anti-windup PI 제어를 사용한 경우
Fig. 9 In case of modified Anti-windup PI control

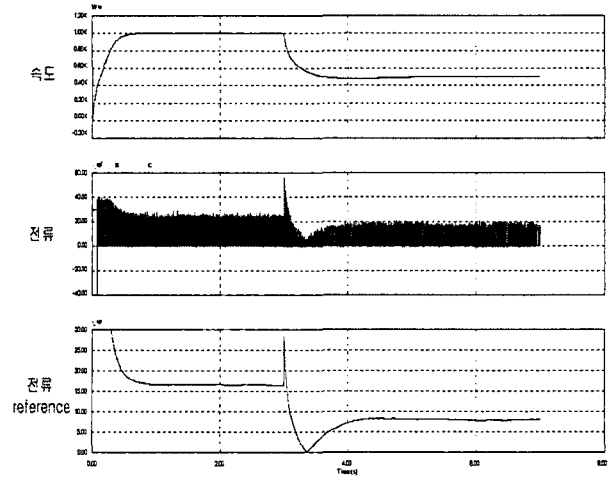

그림 10 Modified Anti-windup PI 제어 + Braking 동작을 사용한 경우
Fig. 10 In case of modified Anti-windup PI control with braking mode

5. 실험결과

SRM의 가변속 구동을 위해 기본적인 위치정보와 속도정보를 필요로 한다. 본 논문에서는 제어의 용이성과 경제적인 측면을 고려하여 600펄스의 증분형 엔코더를 사용하였으며, 증분형 엔코더와 카운터회로 및 ROM을 이용하여 0.6도씩 조정할 수 있도록 하였다.

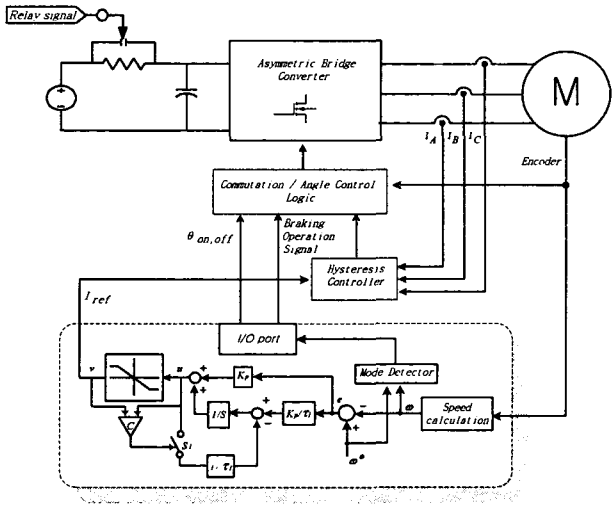

그림 11 전체시스템 구성도
Fig. 11 Set-up of SRM driving system

그림 11은 전체 시스템의 구성도이며, braking 모드 신호는 프로그램에 의해 입력 속도와 실제 속도를 이용하여 판별하도록 하고, port 1을 통해 전류로직(commutation logic)으로 신호를 보내도록 하였다. 전류로직은 EPROM과 카운터 등으로 구성되었고, 전류 제어기는 실제 전류를 피드백 받아 계산된 제어량과 비교하여 전압을 쵸핑하는 히스테리시스 전류제어를 사용하였다.

그림 12 - 그림 14는 일반적인 PI제어기, Modified Anti-Windup PI제어기, Modified Anti-Windup PI제어기 + Braking 동작을 사용하였을 경우 500rpm ⇨ 1500rpm ⇨ 500rpm으로 속도를 변화시켰을 때 파형들이다. 가속시켰을 때 속도응답 특성은 큰 차이가 없지만, 1500rpm ⇨ 500rpm으로 감속시켰을 때 부하관성으로 인하여 응답특성에 큰 차이를 보인다.

그림 15는 braking 모드로 동작하는 경우에 대한 한 상의 전류와 스위칭 파형을 나타낸다. 전류와 스위칭 파형으로 저속에서 발전되는 전류가 작으므로 인덕턴스가 감소하는 구간동안 스위칭이 이뤄져 전류가 평활된다.

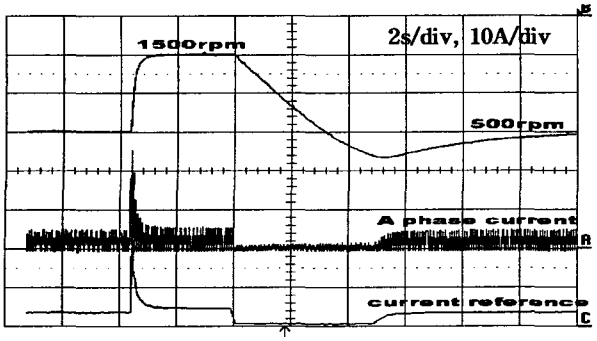

그림 12 일반적인 PI제어를 사용한 경우
Fig. 12 In case of conventional PI control

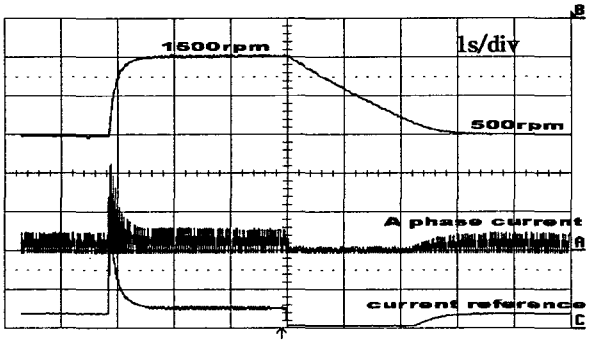

그림 13 Modified Anti-Windup PI제어를 사용한 경우
Fig. 13 In case of modified anti-windup PI control

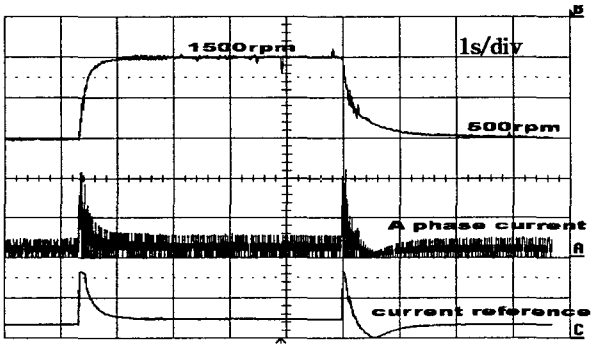

그림 14 Modified Anti-Windup PI제어 + Braking 동작을 사용한 경우
Fig. 14 In case of modified anti-windup PI control with braking mode

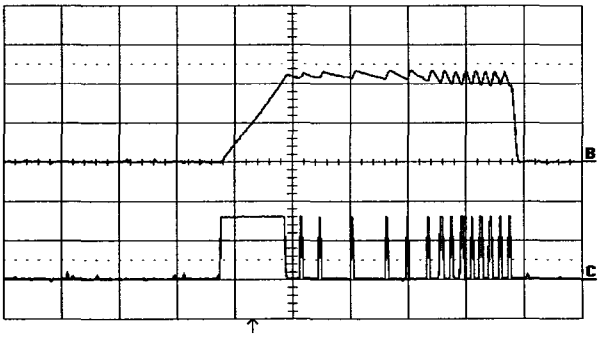

그림 15 braking 동작시 상전류 및 스위칭(500rpm)
Fig. 15 Phase current and gate signal at braking

6. 결 론

본 논문에서는 저가형 제어기와 기존의 시스템에 약간의 수정과 위치정보를 담고 있는 EPROM data를 수정함으로써 4상한 동작을 구현하였으며, 개선된 Anti-windup PI 제어기와 braking 모드를 적용하여 다음과 같은 결과를 얻었다.

1) SRM의 가변속 구동을 위해 Anti-windup 제어기를 사용한 경우 그렇지 않았을 때보다 응답특성이 양호하였다..
2) Braking 모드를 사용하여 감속시에 속도응답을 향상시켰으며, 히스테리시스 제어기와 접목시켜 braking 모드시 전류 리플을 저감시켰다.
3) 본 논문에서 제안한 개선된 Anti-windup 제어기와 braking 모드 동작을 결합하여 빈번한 가감속 특성을 갖는 시스템에 적용할 경우 우수한 속응성을 보장받을 수 있다.

본 연구는 한국과학재단 목적기초 연구(2003-0572-000) 지원으로 수행되었음

참 고 문 헌

[1] R.Krishnan, "Switched Reluctance Motor Drives", *CRC Press*. 2000.
[2] P.J Lawrenson, J.M Stephenson, P.T. Blenkinsop, J. Corda and N.N. Fulton, "Variable Speed Switched Reluctance Motors", *Proc. of IEEE*, vol. 127, pp. 253~256, July 1980.
[3] K. Russa, I. Husain, ME. Elbuluk, "Torque -Ripple Minimization in Switched Reluctance Machines Over a Wide Speed Range", *IEEE IAS*, pp. 668~671, March/April 1998.
[4] Young Joo. AN, Cheol Je. Joe, "Development of Electronic Position Sensor for SRM Drive", *Trans. KIEE*, Vol. 44, NO. 2, pp. 210~213. Feb. 1995.
[5] A. E. Fitzerald, Charles. Kingsley Jr and Stephan. D. Umans, "Electric Machinery", 5th Edition, *McGrawHill*, pp. 446~487, 1992.
[6] 신정기 "비선형 SRM의 Braking을 고려한 속도제어에 관한 연구", *부산대학교 석사학위 논문*, 1997.
[7] Hwi-Beom Shin, "New Anti-windup PI Controller for Variable Speed Motor Drives", *IEEE Trans. Ind.* Vol. 45, No. 3, June 1998.