스위치드 릴럭턴스 전동기의 구동특성향상을 위한 디지탈 속도 제어시스템의 개발

(Development of Digital Speed Control System of SRM for Improvement of Driving Characteristics)

安 珍 雨*
(Jin-Woo Ahn)

요 약

본 논문은 스위치드 릴럭턴스 전동기의 디지탈 속도제어시스템의 개발에 관한 연구이다. 전동기의 운전중 토오크의 맥동을 저감하기 위해 평탄 상전류(flat-topped phase current)가 되도록 전원부에 고속초퍼를 사용하여 운전조건에 따라 상전압을 제어하였다. 또한 토크 발생영역을 최대화하기 위한 제어방식을 제안하고 이를 위한 여자조건을 산정하였다. 제안한 전압 및 위상각 제어방식을 이용하여 폐루우프 속도제어시스템을 구성하였으며, 제어회로는 마이크로프로세서를 사용하였다. 제안한 이론의 타당성을 확인하기 위해 실험결과를 보였다.

Abstract

This paper is to develop a digital speed control system for a Switched Reluctance Motor(SRM). To reduce troque pulsating, phase voltage is cotrolled to be flat-topped phase current using high speed chopper in the DC link side and to maximize torque, novel excitation scheme is proposed and derived these conditions. The voltage and phase control scheme proposed in this paper is used in the closed-loop speed control system which is implemented by using microprocessor. Experimental results are shown to verify this suggestion.

1. 서 론

SRM은 기존의 릴럭턴스 전동기에 전력 전자기술을 적용하되 가변속 구동을 용이하게 한 전동기구이다. 반도체 전력변환 장치를 이용한 동기 전동기나 영구자석을 활용한 브러쉬리스 전동기, 스텝 전동기등도 같은 용도로 개발되어 쓰이고 있으나 이러한 전동기는 자기재료가 고가이고 제어회로가 복잡하여 대용량의 적용시에는 적절하지 못하다. 그러나 SRM은 일반자기회로는 사용하고 전력회로도 비교적 간단하며 에너지변환 효율도 매우 높아 바람직한 대체 전동기구로 주목받고 있다. 그러나 맥동토크가 상대적으로 크고, 고속에서의 轉流문제, 전동기와 전력변환기

*正會員 : 경성대학교 전기공학과 조교수 工博
接受日字 : 1994年 7月 21日

사이의 과도한 에너지순환등의 단점도 지적되고 있다.[1)2)] 이러한 문제점은 대부분 상전류의 맥동과 일정하지 않는 轉流로 인한 것이다.

본 논문에서는 넓은 속도에서 우수한 구동특성의 SRM속도제어 시스템을 구성하기 위해 전류제어형 구동시스템을 구성하되 높은 신뢰도, 경제성, 유연성을 가지는 디지탈 제어시스템으로 설계하고 이를 실현하고저 한다. 구동시스템은 토크맥동을 줄이고 또한 토크극대화를 위한 제어기법을 제안한다.

2. SRM의 구동방식

SRM은 유도기나 동기기와는 토오크 발생방법과 원리가 다르다. 즉 종래의 회전기는 주로 상호토크를 극대화 시키고 계자를 일정하게 한다. 그러므로 전류작용도 일정 여자조건에 맞도록 조정되어 있다. 그러나 SRM은 릴럭턴스 토크를 이용해야 하고, 이를 위해서는 가변여자 즉 스위칭 여자가 필요하며 이는 전력용 소자의 효과적 이용을 기대할 수 있게 한다.

SRM의 속도-토크 제어시 토크 특성은 직류직권 전동기의 특성을 가진다.[1)] 그림 1은 이것을 나타낸다.

규준속도(base speed)ω_b 이하에서는 일정토크 영역이다. 토크제어를 위해서는 전압제어방식과 전류제어방식이 제안되어 있다. 이 속도를

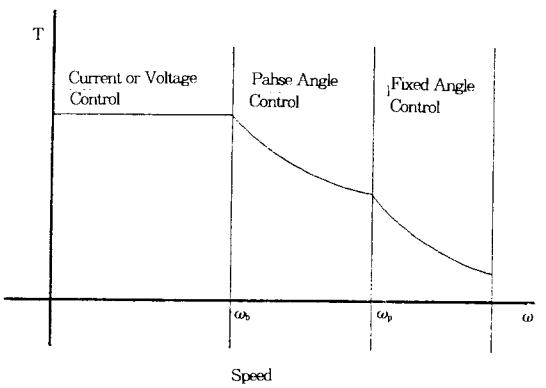


그림 1. SRM의 속도-토크 특성 곡선
Fig. 1. Spped-Torque curve of a SRM

넘어서면 충분한 여자시간을 확보할 수 없어 단일펄스로 위상을 제어하여 동작해야하고 속도의 증가에 따라 토크는 감소하여 정출력구간이 된다. 속도가 더욱 증가하여 ω_p이상이 되면 역 토크의 발생으로 더 이상의 토크조정이 어렵고 토크는 속도의 제곱에 반비례하여 감소하게 된다.

한편, SRM의 속도, 토크 제어는 그 제어원리가 비교적 간단하여 복잡한 제어회로의 구성없이 실현이 가능하다. 즉 토오크는 상전류 또는 전압과 인덕턴스 변화율로 표현되므로 이 값을 조정하면 토크의 제어가 가능하다. SRM의 구동방식은 전압제어 구동방식(Voltage Controlled Drive)과 전류제어 구동방식(Current Controlled Drive)이 있다. 전압제어 구동방식은 초퍼 또는 PWM방식으로 상전압을 변화시켜 속도, 토크를 제어하는 방식으로 제어회로는 간단하나 응답성이 떨어진다. 이에비해 전류제어 구동방식은 전류-토크 관계식에서 토크를 직접 제어하는 방식으로 구동 특성이 뛰어나고 넓은 속도범위에서 정밀한 속도제어가 가능한 우수한 제어방식이다. 그러나 제어회로는 상대적으로 복잡하고 실시간 연산이나 룩업테이블등을 사용해야 하므로 아날로그 방식으로 구성하는 것은 매우 어렵다.

이와같이 넓은 속도에서 구동하기 위해서는 전압제어와 위상제어가 행해져야하고 이 두방식을 효율적으로 조정할 수 있는 제어시스템의 도입이 필요하다.

3. 새로운 구동방식의 제안

전동기의 발생토크는 자기회로의 비선형성을 무시하면

$$T(\theta, i) = \frac{1}{2} i^2 \frac{dL(\theta, i)}{d\theta} \quad (1)$$

로 표시된다. 그러므로 토크의 방향은 상전류의 방향에 관계없이 인덕턴스 프로필에 의해 정해지며 그 크기는 전류의 크기와 인덕턴스변화율에 의해 정해진다. 즉 제어 파라미터는 주어진 인덕턴스 프로필에서는 상전류 또는 전압의 크기

와 위상에 의해 정해진다. 그러므로 요구 토크에 따라 전압 또는 전류크기와 위상을 구해야 할 것이다. 일반적으로는 전류의 크기는 전류제한기를 사용하여 상전류를 제어하나 각 상마다 전류초핑을 행하는 것보다 전원단에서 고속초핑하여 전압을 조정하여 제어를 행하는 것이 맥동토크 저감이나 손실저감에 효과적이다. 그러므로 본 연구에서는 DC링크 전압단에서 고속초핑으로 전압의 크기를 조정하고 상스위치는 온, 오프만 행하도록 설계한다.

전압과 토크와의 관계를 검토해보면, 전동기의 전압방정식에서

$$V=Ri+L(\theta,i)\ \frac{di}{dt}+i\ \frac{dL(\theta,i)}{d\theta}\ *\ \frac{d\theta}{dt} \qquad (2)$$

이다. 만약 상 여자가 인럭턴스최소의 구간에서 이루어진다면 평탄 상전류(flat-topped phase current) i_{ft} 는

$$i_{ft}=\frac{V}{R+k\omega_r} \qquad (3)$$

와 같이 되고, 이때의 토크는 식(1)에서

$$T(\theta)=\frac{1}{2}\ \frac{dL(\theta,i)}{dt}\ *\ \frac{V^2}{(R+k\omega r)^2} \qquad (4)$$

이 되어 토크는 전압의 항으로 표시될 수 있다. 여기서 $k=dL/d\theta$이다.

전동기 속도와 요구 토크가 주어지면 식(3)에 의해 초퍼전압을 산정할 수 있으며 이 전압에 의해 초퍼의 초퍼비가 조정된다.

각 상의 스위칭 온, 오프 각 즉, 스위칭 구간을 검토해 보자. 식(2)에서 역기전력과 저항을 무시하면 여자 시점에서 인덕턴스는 일정하므로 스위칭 온, 오프 각은 식(5), (6)과 같이 일정하게 유지할 수 있어 轉流회로를 간단히 할 수가 있다.

$$\theta_{ft-on}=\frac{L_{min}}{k} \qquad (5)$$

$$\theta_{ft-off}=L_{max}\frac{V}{k\ V_b} \qquad (6)$$

4. 제어시스템의 구성

4.1. 전력변환부

제안한 제어시스템의 전력변환부는 클래식 인버터이다. 구동용 전력 변환장치로는 다양한 방식이 제안되어 있으며 그 중 클래식형과 C-dump형이 많이 채택되고 있다. 클래식형은 상제어가 독립적이어서 다양하고 유연성있는 제어가 가능하고 넓은 속도범위, 높은 전압, 대용량의 구동에 적당하나 상당 소요소자수가 많은 단점이 있다. 이에 비해 C-dump형은 사용소자수를 줄일 수 있으나 상간 독립제어가 어려워 고속, 대용량 구동에 적합하지 않으며, dump용 캐패시터에 의해 구동조건에 제약도 많아 제어가 어렵고 신뢰성도 떨어지는 단점이 있다. 그러므로 본 구동시스템은 넓은 속도범위에서 연속적 가변속제어를 실현하고저 하므로 클래식 인버터를 기본으로 하여 설계하는 것이 타당할 것이다. 그림 3은 초퍼를 가진 클래식 인버터이다. 상 스위치의 하단부는 상 중첩이 없는 상과 공유하도록 하여 소자를 절감하도록 하였다. 각 상의 상단 환류다이오드가 초퍼단앞에 연결되어 있는 것은 전력회생 뿐

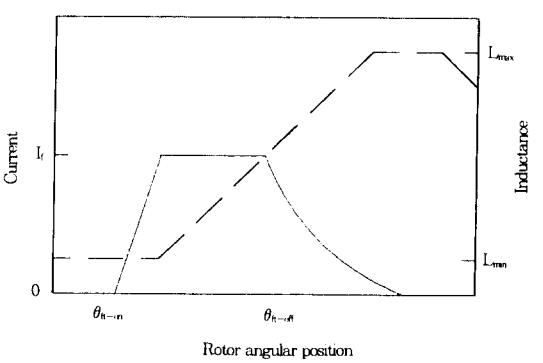


그림 2. 평탄 상전류
Fig. 2. Flat-topped phase current

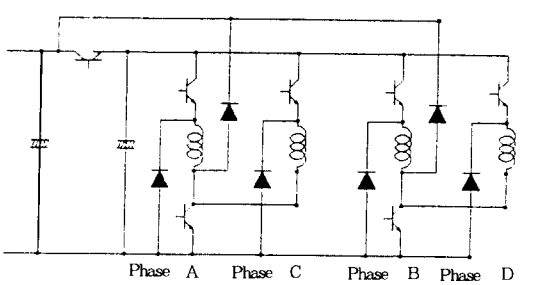


그림 3. 제안한 전력회로
Fig. 3. Proposed power converter

만 아니라 감자전압을 전원전압으로 일정하게 확보함으로써 轉流각을 고정시킬 수 있어 相轉流를 용이하게 할 수 있으며, 감자시 전류의 감쇄를 크게하여 토크발생영역을 극대화할 수 있어 동작속도구간을 넓힐 수 있다. 초퍼부는 높은 주파수로 초핑이 가능하면서 스윗칭손실을 최소화하기 위해 FET를 사용하였다.

4.2. 구동시스템의 구성

SRM속도제어시스템의 전체블록도는 그림 4와 같다. DC링크전압은 초퍼로 제어되어 평탄 상전류값으로 제어되며 그 크기는 식(4)에 의해 얻어지고, 스위칭 온, 오프각은 식(5), (6)과 같이 일정한 값으로 구동된다. 전체 제어시스템은 마이크로 프로세서로 구성하였다. 그림 5는 제어소프트웨어의 흐름도를 나타낸다. 여기서 속도제어기는 디지탈 P-I제어를, 초핑 비는 식(4)에 의해 상전압의 제어를 행한다.

5. 실험결과

구성한 제어시스템을 통해 제안한 제어방식의 타당성을 확인하였다. 구동시 상전류와 게이트신호, 속도응답특성은 그림 6과 같다. 상전류의 잡음은 드라이브회로의 전원으로 스위칭레귤레이터를 사용한 때문이다. 또한 속도지령에 대한 속도응답성은 비교적 양호한 특성을 보였다. 그림 7은 구동시스템의 속도-토크특성을 보인 것으로 제안한 방식은 기존의 상전류 제한에 의한 전압초핑방식에 비해 토크가 증가하였다. 이는 상전류가 평활하여 맥동토크가 감소되고 이에

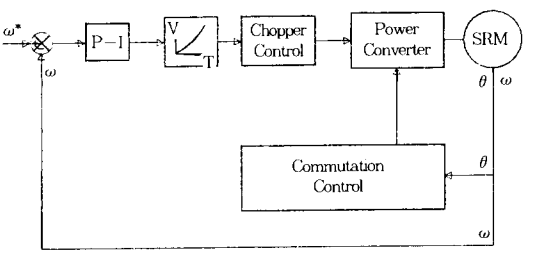


그림 4. SRM속도제어시스템의 블록도
Fig. 4. Block diagm of SRM speed control system

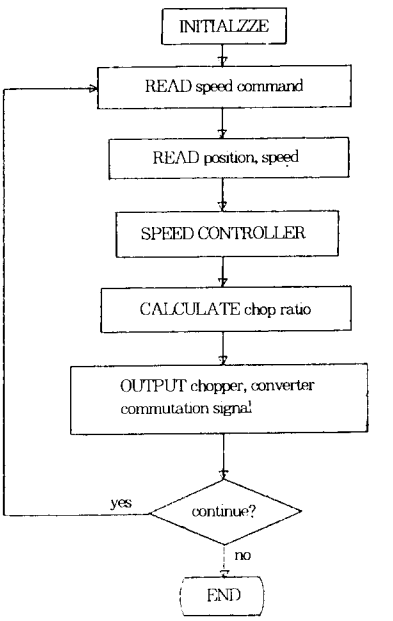
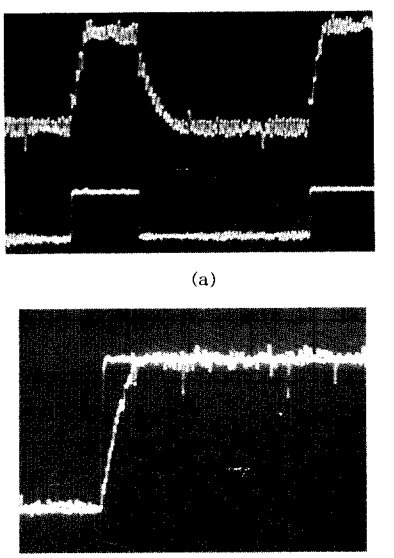


그림 5. 제어흐름도
Fig. 5. Control flow chart



(a)

(b)

그림 6. 상전류와 속도응답특성
(a) 상전류(상)(수직 : 2A/iv., 수평 : 2ms/Div.)와 게이트신호(하)
(b) 속도응답특성(수직 : 500rpm/iv., 수평 : 0.5sec/Div.)
Fig. 6. Phase current and step response
(a) phase current(uper)(Ver : 2A/Div., Hor : 2ms/Div.) and gate signal(lower)
(b) step response(Ver : 500rpm/Div., Hor : 0.5sec/Div.)

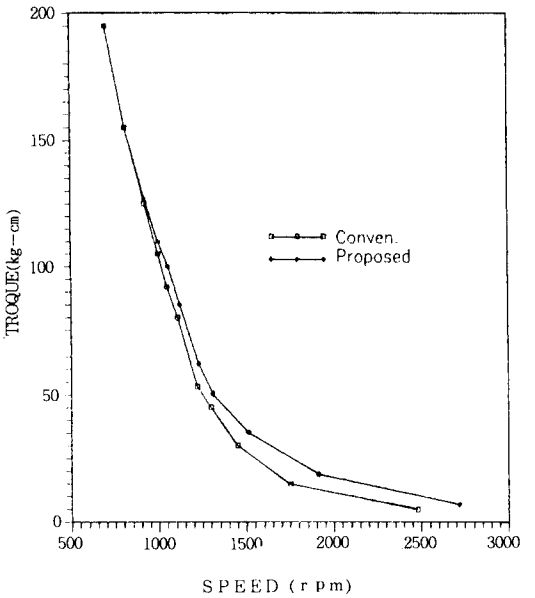


그림 7. 속도-토크 특성
Fig. 7. Speed-torque charateristics of the control system

따라 손실도 저감되기 때문이다.

6. 결 론

본 논문은 SRM의 가변속제어를 위한 디지탈 속도제어시스템에 관해 기술하였다. 속도제어시스템은 넓은 속도범위에서 맥동토크를 저감하고 손실을 줄이기 위해 초퍼와 클래식인버터를 결합하고 쵸퍼에서는 속도에 따라 초퍼비를 조정하여 평탄 상전류가 되게 한다. 상스위칭 온각과 오프각은 고정되고, 속도제어는 속도루우프에 의해서 상인가전압을 조정하므로 비교적 간단한 轉流 및 제어회로로 구성할 수 있었다.

구성한 시스템으로 1/4Hp 8/6SRM을 구동한 결과 600~3,000rpm까지 구동하였으며 구동특성도 우수하였다. 향후 구성한 시스템의 토오크 및 효율의 극대화를 위한 연구가 계속되어야 할 것이다.

본 연구는 과학재단의 연구비지원에 의해 수행되었습니다. 과제번호 941-0900-092-1

참 고 문 헌

1) P. J. Lawenson, J. M. Stephenson, P. T. Blenkinsop, J. corda, N. N. Fulton "Variable-speed Swiched Reluctance Motors", IEE Vol. 127, Pt. B, No. 4, July, pp. 253~265, 1980.

2) W. E. Ray, P. J. Lawenson, R. M. Davis, J. M. Stephenson, N. N. Fulton, R. J. Blake, "High Performance Switched Reluctance Brushless Drives", IEEE Trans. Vol. IA-22, pp. 722~730, 1988.

3) C. Elmans, H. Parra, "A DSP Controlled Switched Reluctance Drive System for Wide Rwnge of Operating Speed", Proc. of IEEE-PESC '92, pp. 84~850, 1992.

4) S. Vukosavic, R. Stefanovic, "SRM Inverter Tropologies : A Comparative Evaluation", IEEE Trans. Vol. IA-27 pp. 1034~1047, 1991.

5) B. K. Bose, T. J. E. Miller, P. M. Szczesny, W. H. Bicknell, "Microcomputer Control of Switched Reluctance Motor", IEEE Trans. Vol. IA-2. No. 4, pp. 708~715, 1986.

6) J. W. Ahn, Y. B. Choo, Y. M. Hwang "A Design method for High Efficiency SRM Dirve", IMPEC '94, Beijing, China, 1994.

7) Jin-Woo Ahn, G. S. Gong, Y. M. Hwang, "Predicting the Torque Characteristics of Switched Relucatance Motor by using Nonlinear Inductance Profile", IEEE-TENCON Conf. pp. 580~584, 1993.

8) 안영주, 조철제, 안진우, 황영문, "Novel C-dump 인버터에 의한 SRM의 구동특성", 전기학회 추계학술회의논문집, pp. 163~165, 1993.

◇ 著 者 紹 介 ◇

안 진 우(安珍雨)
1958年 5月 26日生. 1984年 釜山大工大 電氣工學科 卒. 1992年 2月 同大學院 電氣工學科 卒(博士). 現在 慶星大學校 電氣工學科 助敎授