전력전자학술대회 논문집 2001. 7. 4 ~ 7. 7

SRM의 최적운전을 위한 스위칭각 선정에 관한 연구

오석규, 이상훈*, 김창섭*, 안진우*
진주산업대학교, *경성대학교

Study on Switching Angle Characteristic for Optimal Driving Condition of SRM

Seok-Gyu Oh, Sang-Hoon Lee*, Chang-Sub Kim*, Jin-Woo Ahn*
Chinju National University, *Kyungsung University

ABSTRACT

The torque of SRM depends on phase current and the derivative of inductance. But the inductance of SRM is nonlinearly changed according to rotor position angle and phase current because of saturation in magnetic circuit. Therefore this has a concern in torque ripple and speed variation, and it is difficult to control the desired torque The torque of SRM depends on phase current and the derivative of inductance. But the inductance of SRM is nonlinearly changed according to rotor position angle and phase current because of saturation in magnetic circuit, and it is difficult to control the desired torque.

This paper proposes an optimization control scheme by adjusting both the turn-on and turn-off angle according to high efficiency points which are simulated by GA-Neural Network, which is used to simulate the reasonable switching angle which is nonlinearly varied with rotor speed and load.

1. 서 론

반도체 기술이 1960년대에 창출되고 개발됨에 따라 인류의 활용기술의 형태가 아날로그 방식에서 디지털화, 전력변환 기술의 반도체화 및 통신기술의 IC화는 우리의 생활방식과 산업구조를 획기적으로 첨단화하게 되었다. 아울러 사회 전반의 전력활용은 다기능화, 고효율화되어 크게 신장하고 있다.

한편, 에너지의 활용의 바탕이 되고 있는 전동력 응용은 스위칭 인버터 기술의 발전으로 인한 교류전동기의 직류전동기화 및 영구자석의 개발로 인한 브러쉬레스화로 그 활용형태가 획기적으로 바뀌게 되었으며, 산업구조의 다기능화에 대응하기 위하여 분산 제어시스템용 직접구동 전동기의 활용이 두드러지게 되었다.

최근까지의 SRM에 대한 개발연구의 방향과 주된 관심사는 기계적 출력의 극대화 및 고효율화, 운전 정도 및 신뢰도, 그리고 드라이브시스템의 향상을 위한 적정 설계와 제어에 집중되어 있었다. 그러나 최근 정밀제어 및 가정용 전자제품으로의 활용범위를 넓히는데 있어 가장 장애가 되고 있는 것이 운전특성의 안정화를 위한 토크 리플과 소음 및 진동으로 이에 대한 연구, 시스템의 제어성능을 제고하기 위한 다양한 제어기법에 대한 연구가 활발히 추진되고 있다.

운전특성의 안정화에 대한 연구는 전류원 인버터를 사용하여 상전류를 제어함으로써 토크리플을 억제하는 연구와 가변 전압원 인버터를 이용한 고정도 운전에 대한 연구가 주목받고 있다. 그러나 이들은 범용으로 구현하기가 어렵다.

전압원 스위칭 인버터에서 적정 전류파형은 인가전압의 제어와 최소인덕턴스 구간에의 선행스위칭각 제어방법(Advance angle control method)으로 형성된다. 선행스위칭각의 조정은 회전자의 위치검출기에 의하여 검출된 위치신호를 이용하여 제어알고리즘에 의하여 조정 제어한다.

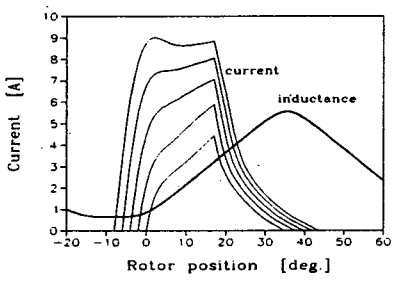
본 논문에서는 SRM의 최적의 운전조건을 도출하기 위해 임의의 속도와 토크에 대응하는 최적의 스위치 온각과 오프각을 선정하는데 목적을 두고 있다 그러나 SRM의 경우 비선형성이 강한 전동기이기 때문에 여러 가지로 고려해야 할 것이 많다. 또한 스위치 온각과 오프각이 서로 연관성이 있기 때문에 이를 각각 독립적으로 운전하기가 어렵다. 따라서 임의의 속도에 따른 최적의 스위치 오프각을 먼저 선정한 다음 스위치 온각을 선정하여 전 운전영역에서 고효율 운전이 가능하도록 부하와 속도에 따른 스위치 온, 오프 각을 조정하여 최적의 운전점을 구하고 하였다.

2. SRM의 동특성 해석

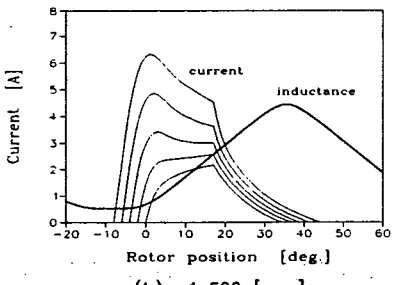
SRM의 스위치 온, 오프 각은 전류파형의 크기와 형태를 조정하고 동시에 토크의 크기와 형태를 변화시켜 토크리플과 속도변동을 유발시키는 등 운전특성과 깊은 상관관계를 갖는다. 그리하여 회전자 속도와 부하조건에서의 최적운전특성을 가지기 위해서는 정밀하게 조정되어야 한다.

2.1 선행스위칭각에 따른 운전특성

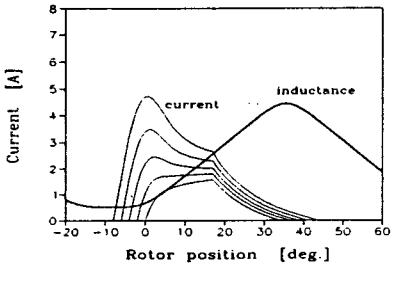
SRM 드라이브의 운전에 있어서 전류도통각 동적제어 방식을 채택하면 부하변화에 의하여 전류도통각이 변화한다. 그러나 토크각은 일정하므로 동기기와 같은 토크의 증감이 직접 일어나지 않는다. 이때 선행스위칭각이 증감하여 초기확립전류가 증감하고 전류파형의 형태가 변화하여 토크의 증감이 이루어진다. 그리하여 부하토크와 평형상태가 이루어 질 때까지 선행스위칭각의 조정제어가 이루어진다.



(a) 1,000 [rpm]



(b) 1,500 [rpm]



(c) 2,000 [rpm]

그림 1 선행스위칭각에 따른 상전류
Fig. 1 Phase currents according to advance angles

인가전압이 일정할 때의 선행스위칭각에 따른 전류파형의 형상은 그림 1과 같다. SRM 드라이브의 특성 해석은 가변인덕턴스와 그 변화율이 자기회로의 회전위치에 따른 포화현상으로 인하여 비선형적으로 달라지는 특성을 가지고 있으므로 이를 고려하여야 한다.

일정 전압하에서는 선행스위칭각에 의해 전류의 크기가 결정됨을 그림 1에 나타낸다. 그리고 토크 발생구간에서의 전류는 인가전압과 속도 역기전력에 의해 결정되는 한 값의 전류로 수렴하고 있다. 즉, 선행스위칭각이 커서 인덕턴스가 증가하기 시작하는 회전자 위치에서의 초기전류가 크면 토크발생구간에서 점차 줄어들어 인가전압과 속도역기전력에 의해 결정되어지는 전류의 크기로 근접하게 된다.

회전자 속도가 각각 다른 경우 선행스위칭각의 변화를 보면 회전자 속도가 빠를수록 전류의 확립이 작다. 회전자 속도와 초기전류는 반비례하여 속도가 빨라지면 초기전류값이 작아진다. 또한 회전자 속도가 빠를수록 속도역기전력이 커져서 토크발생구간에서의 전류도 작고 발생토크도 작아지게 된다. 그러하여 회전자 속도의 가감에 따라 선행스위칭각을 가감하면 일정한 초기전류를 얻을 수 있게 될 것이다.

2.2 선행스위칭각에 따른 실효토크(평균토크)특성

부하에 대응하여 발생토크가 유발하는 상관관계는 SRM 드라이브의 속도-토크특성을 따른다. 이러한 속도-토크특성은 직류직권전동기와 같이 수하특성을 갖게 되며, 이들은 선행스위칭각과 인가전압에 대하여 일정한 함수관계를 갖는다. 이러한 함수관계는 토크발생구간에서의 전류파형의 비선형적인 변화로 인하여 정식화하기가 어렵다.

그림 2는 일정전압, 일정속도에서 특정한 선행스위칭각에 따른 토크 특성곡선이다. 이는 동기기에서의 전력각 (또는 토크각) 조정제어특성과 유사하며 SRM 드라이브에서는 전력각 대신 선행스위칭각이 그 역할을 대신하는 것과 같다. 이 때 토크는 특정한 선행스위칭각에서의

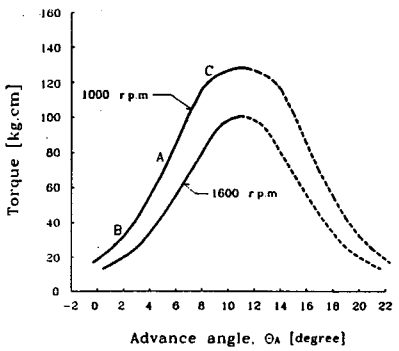


그림 2 일정속도에서의 선행스위칭각에 대한 토크 특성
Fig. 2 Torque Characteristics according to advance angles at constant speed

실효평균토크로 대응하게 될 것이다.

이러한 상관관계는 가장 적정한 선행스위칭각을 연산제어기에 의하여 제어하는 것을 어렵게 하는 요인이며, 동시에 연산제어에 의한 토크리플과 속도순시변동율의 억제가 쉽게 이루어지지 않는다.

2.3 스위치 오프각의 선정

SRM의 제어변수 중 스위치 오프각의 선정은 최대 토크 발생영역을 확대하는 동시에 부토크 발생을 억제하는데 역점을 두어야 한다. 이를 위해 선정방법은 임의의 속도와 토크에서의 임의의 스위치 온각과 오프각을 주었을 경우 효율이 좋은 스위치 오프각을 선정하는 것이 일반적인 방법이다. 그러나 이는 제어성이 강한 스위치 온각의 영향을 많이 받아 스위치 오프각의 적절한 선정에 부적절하다.

SRM의 상전류는 그림 1에서 보는 바와 같이 한 전류로 수렴하고 있음을 알 수 있다. 이 전류는 인가전압과 속도역기전력에 의해 결정되어진다.

$$i(\theta) = \frac{v(\theta)}{\omega} / \frac{dL(\theta,i)}{d\theta} \qquad (1)$$

식 (1)에서 자기포화가 없다면 수렴되는 전류는 인가전압과 속도에 의존한다. 그러나 SRM의 자기회로의 포화 때문에 이 전류를 예측하기가 어렵다. 이를 위해 전자기 해석 프로그램을 이용하여 각 속도에서 수렴하는 전류를 정하고 이에 따라 스위치 오프각을 가변하여 최적의 스위치 오프각을 선정한다.

토크는 ω^{-2} 에 비례하여 감소하지만 이것은 스위칭각을 비례해서 증가시켜 주면 된다. 여기서 스위칭각의 증가는 주로 선행스위칭각의 증가에 의해 이루어진다. 그러면 도통시간은 ω^{-2} 에 따라서 감소하지 않고 자속도 같아지므로 여러가지 특성을 얻을 수 있다. 특히 전속도 범위에서 정출력을 얻을 수 있다.

SRM 드라이브의 기본적인 운전특성은 그림 3에서 보는 바와 같이 직류직권전동기의 속도-토크특성을 가지며, 앞서 초기확립전류에 대한 해석에서 선행스위칭각과 인가전압으로서 상전류의 크기를 제어할 수 있고 이 제어된 전류에 의해 토크가 발생되기 때문에 선행스위칭각과 인가전압을 적절한 제어를 통하여 일정속도운전도 가능하다.

지금까지의 일정속도제어방식은 부하의 변동을 감쇠시키는 방향으로 선행스위칭각을 계산에 의해 간접적으로 조절하는 것이었다. 그러나 이러한 제어는 정현파 전류에 의해 구동하는 일반전동기제어방식에서 응용된 것으로 상전류의 형상이 다양하게 가변되고 비선형성이 강한 SRM 드라이브 시스템에서는 정확도가 떨어지게 되고 동특성이 저하되는

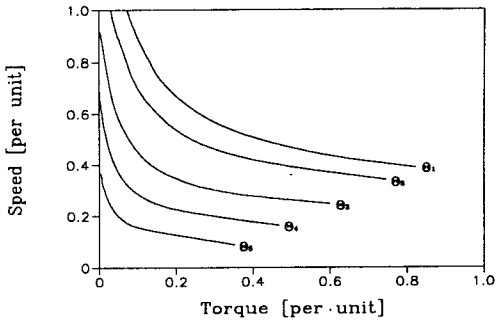


그림 3 각 스위칭각에 대한 속도-토크 특성
Fig. 3 Speed-torque curves to constant torque angle

일반적인 단점을 보이고 있다.

SRM은 임의의 전압과 속도에 대해서 부하에 따라서 고효율로 구동되는 도통각이 존재하게 된다. 일반적으로 SRM을 고효율로 구동하기 위해 도통각을 제어하는 여러 가지 제어방법을 사용하고 있지만 이들은 많은 실험과 경험에 의해 운전을 하고 있다.

3. 제어알고리즘의 적용

신경회로망은 생물학적 뉴런(Neuron)의 가장 기본적인 기능과 유사한 기능을 가진 요소들로 구성되어 있어 뇌와 유사한 많은 특성을 보유하고 있다. 제어 대상 시스템이 미지의 비선형성을 갖는 경우에도 제어대상의 입출력패턴을 학습시킴으로 시스템식별을 효과적으로 할 수 있어 원하는 제어특성을 얻을 수 있다.

진화 알고리즘은 구조가 간단하고 방법이 일반적이어서 응용범위가 매우 넓으며, 특히 탐색능력이 뛰어나고, 국부수렴을 극복하기가 쉬워서 최근에는 신경망, 퍼지 로직과의 결합으로 그 응용범위는 점점 늘어나고 있는 추세이다.

SRM의 고효율로 운전하기 위해 비 선형 시스템에서 우수한 성능을 보이고 있는 신경회로망을 이

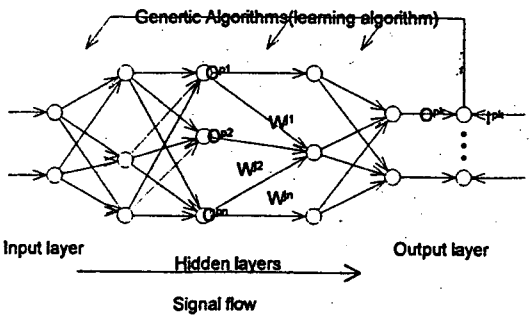


그림 4 학습 알고리즘의 블록도
Fig. 4 Block diagram of training algorithm

용하여 스위치 온각과 입력 전압과 토크, 속도에 대한 효율의 관계를 관측하고자 한다.

그림 4는 신경회로망의 역전파(Back-propagation) 부분을 GA로 구성하여 전체 시스템을 간략하게 나타낸 그림이다. SRM의 최대효율로 운전되기 위한 조건을 도출하기 위해 추출해낸 임의의 데이터를 학습하는 로직은 신경회로망이 처리하고 은닉층의 weight function을 구하는 로직은 국부수렴을 피하고 탐색능력이 뛰어난 GA를 사용하여 신경회로망의 단점을 보완하였다.

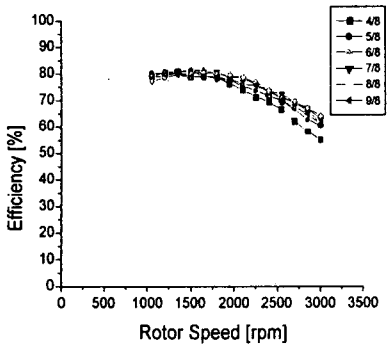
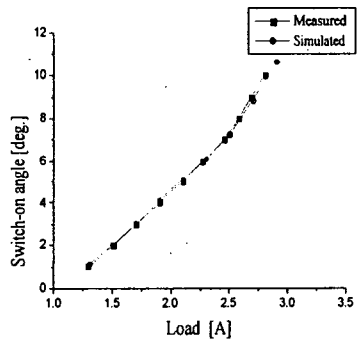
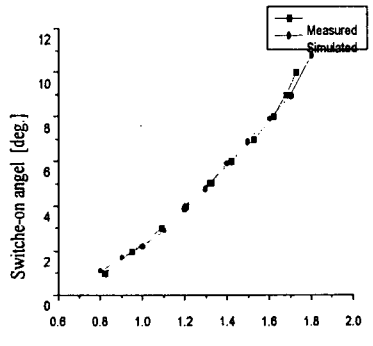


그림 5 기초실험 데이터
Fig. 5 Basic test data



(a) 1500 [rpm]



(b) 2400 [rpm]

그림 6 부하에 따른 스위치 온각 특성
Fig. 6 Switch-on angle characteristics according to load

그림 5는 스위치 온/오프에 따른 고효율 운전조건을 만족하는 신경회로망의 학습에 사용한 기초실험 데이터의 일부를 보여주고 있다.

GA-신경회로망을 이용한 최적운전조건을 가지고 엔코더를 통하여 얻게되는 회전자 속도와 부하여 해당하는 DC 링크에 CT에서 얻게 되는 직류전류를 입력으로 받는 임의의 부하와 속도에서의 최적운전을 할 수 있는 실제 제어시스템을 구성하도록 한다. 그림 6은 각 속도에서의 실험데이터 및 시뮬레이션 결과를 보여주고 있다.

4. 결 론

SRM 드라이브의 동작은 펄스 전압의 인가와 자기포화가 심한 영역에서 운전됨으로 인덕턴스가 비선형적으로 변화하여 그 동작특성을 예측하여 전운전 영역에서 최적 운전을 하기가 어렵다. 이를 극복하기 위하여 비선형 시스템에 적합한 제어알고리즘을 채택하여야 한다.

본 논문에서는 SRM 드라이브시스템의 운전성능을 향상시키기 위한 과제로써 임의의 속도, 토크에서 최적의 스위칭 각으로 운전할 수 있도록 스위치 온각과 오프각을 독립적으로 해석하기 위하여 스위치 오프각은 평활토크에서의 효율로서 선정하고 이를 바탕으로 스위치 온각, 즉 선행스위칭각에 의한 순시 토크에 대응되도록 하였고 이 과정에 임의의 속도, 토크에서의 선행스위칭각의 선정은 GA-신경회로망을 이용한 학습을 통하여 비선형적인 요소를 감안하였다.

참 고 문 헌

[1] 안진우, 황영문, *스위치드 릴럭턴스 전동기 구동과 응용*, 신지서원, 1998.

[2] D.A. Torrey and J.H.Lang ; "Modelling a nonlinear variable-reluctance motor drive," Proc. IEE, Vol. 137, Pt-B, No. 5, pp. 314~326, 1990.

[3] P.C. Kjaer, J.J. Gribble, T.J.E. Miller ; "High-Grade Control of Switched Reluctance Machines," Proc. of IAS/IEEE Sandiego, California, pp. 92~100, 1996.

[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] Toshio Fukuda, Takanori Shibata, "Theory and Applications of Neural Networks for Industrial control systems", IEEE Trans. on Indust. Elec., pp. 472~489, vol. 39, No. 6, 1992.

[6] Zbigniew Michalewicz, *Genetic Algorithms+Data Structures=Evolution Programs Second Edition*, Springer- Verlag 1992.