

GA/NN을 이용한 SRM의 고효율 구동

김봉철, 오석규*, 안진우
 경성대학교, *진주산업대학교*

High Efficiency drive of SRM using GN/NN

Bong-Chul Kim, Seok-Gyu Oh*, Jin-Woo Ahn
 Kyungseong Univ., *Chinju National Univ.

ABSTRACT

The torque of SRM depends on the level of phase current and the derivative of phase inductance. But the phase inductance of SRM is not linearly changed according to rotor position angle because of saturation in magnetic circuit. Therefore it is difficult to control the desired torque.

This paper proposes a model of control system for high efficiency drive of SRM. The GA-Neural Network is used to simulate the reasonable switching angle which is nonlinearly varied with rotor speed and load.

1. 서론

스위칭반도체가 실용화되는 추세에 따라 소용량의 펄스형 전원의 개발로 1970년대는 VR형 스텝핑 전동기가 실용화되었고, 1980년대 초에는 대용량 전력용 반도체의 실용화로 최근 대용량의 스위치드 릴럭턴스 전동기(Switched Reluctance Motor, SRM)가 그 효율성을 인정받기에 이르렀다. 그리하여 SRM를 이용한 고효율, 고속, 고효율 그리고 다기능의 운전시스템의 개발에 대한 연구가 이루어지게 되었다.

종래의 회전기기는 상호토크(Mutual torque)를 극대화시키기 위해 일정 자계 여자방식을 취하지만 SRM는 이중돌극형 구조로써 릴럭턴스 토크(Reluctance torque)를 이용하므로 연속적인 스위칭여자가 필요하다. 따라서 SRM 드라이브의 제어는 상호토크를 이용하는 회전기와 달리 유도기나 동기기의 제어개념을 적용하기가 어렵다.

또한, SRM은 타 전동기구보다 높은 자속밀도에서 구동되며, 회전자위치에 따른 스위치 온, 오프

각의 제어는 많은 변수에 영향을 받으므로 적정운전특성에 따라 변한다.

최근까지의 SRM에 대한 개발연구의 방향과 주된 관심사는 기계적 출력의 극대화 및 고효율화, 운전 정도 및 신뢰도, 토크 리플과 소음 및 진동저감 그리고 드라이브시스템의 향상을 위한 적정설계와 제어에 집중되어 있었다. 그러나 최근 정밀제어 및 가정용 전자제품으로의 활용범위를 넓히기 위해서 운전특성을 안정화시키는 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.

SRM 드라이브에서의 토크는 여자전류의 공급과 가변인덕턴스의 변화율에 비례한다. 따라서 가변인덕턴스의 선형성이 안정한 운전엔 필수적인 조건이다. 그러나 SRM의 토크발생이 대부분 자기회로의 포화영역에서 이루어지므로 이러한 포화현상으로 인하여 가변인덕턴스가 심한 비선형성을 갖게 되며 이로 인하여 자화 전류의 파형은 각 운전조건에서 다양하게 변하게 되어 최적의 운전조건을 도출하기가 어렵다. 제어변수인 선형 스위칭각과 인가전압은 안정화 운전을 위해 적절히 제어되어야하므로 비선형 특성을 가지는 운전조건에 충족시킬 수 있는 제어기법이 요구된다.

본 논문에서는 비선형성이 강한 SRM 드라이브에서 최적의 운전조건을 도출하기 위해 비선형 시스템에 강한 최적화 알고리즘으로써 신경회로망(Neural network)과 유전자 알고리즘(Genetic Algorithms : 이하 GA)을 이용하여 전 운전영역에서 고효율 운전이 가능하도록 부하와 속도에 따른 스위치 온, 오프 각을 조정하여 최적의 운전점을 구하고, 이를 이용하여 제어시스템을 구성하고자

한다.

2. SRM의 동특성 해석

2중 돌극형 VRM은 릴럭턴스 토크의 이용을 극대화하는 전동기구로서 전동기의 토크는 릴럭턴스가 최소로 되는 방향, 즉 여자되는 상권선의 인덕턴스가 최대가 되는 방향으로 발생한다.

SRM의 토크 식을 구하기 위하여 코에너지(Coenergy) W_c 의 개념을 도입하여 구하면 다음과 같다.

$$W_c = \frac{1}{2} i(\theta)^2 \cdot L(\theta) \quad (1)$$

여기서, $i(\theta)$ 는 상권선의 전류, $L(\theta)$ 은 회전자 위치에 따른 인덕턴스이다. 한 상에 대한 토크 T 는 회전자의 위치각 θ 에 대한 코에너지의 편미분항으로서

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

과 같이 된다.

SRM은 토크 발생 구간에서는 회전 진행 방향으로 릴럭턴스가 증가하며, 전동기의 작용 인덕턴스 $L(\theta)$ 가 증가하므로 기저력 발생을 위한 전류의 상승률은 그림 1에서와 같이 완만해진다.

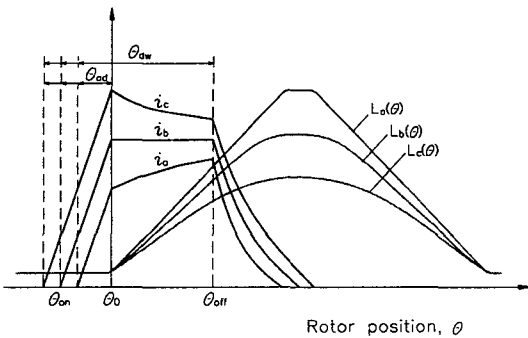


그림 1 인덕턴스 프로파일과 전류

Fig. 2 Inductance profile and current

상전류는 인가전압 $v(\theta)$, 초기치 전류 $i(\theta_0)$, 속도 역기전력(speed back e.m.f) 및 권선 전압강하에 의하여 결정된다. 즉 전압원 구동 SRM에서의 전압 방정식은

$$v(\theta) = Ri(\theta) + L(\theta, i) \frac{di(\theta)}{dt} + i(\theta) \frac{dL(\theta, i)}{d\theta} \frac{d\theta}{dt} \quad (3)$$

로 표현되며, 식 (3)의 오른쪽 첫째 항은 권선 저항

강하, 둘째 항은 리액턴스 강하, 셋째 항은 속도 역기전력이고 동시에 기계적 에너지로 변환되는 성분을 각각 나타내고 있다.

SRM 드라이브를 선형적으로 해석하면 이 전동기의 속도-토크특성 곡선은 직류직권전동기와 유사함을 알 수 있다. 이것은 SRM 드라이브의 속도가 감소함에 따라 권선 여자시간이 역으로 증가하고 자속이 증가한다는 사실에서 쉽게 알 수 있다.

그러나 토크는 자속에 비례하므로 토크 T 는

$$T = \frac{k}{\omega^2} \quad (4)$$

인 특성을 갖는다. 이 때 전력 P 는

$$P = \frac{k}{\omega} \quad (5)$$

가 되어 직류직권전동기와 유사하므로 단자전압이나 공급전류로서 SRM 드라이브를 제어할 수 있다. 그러나 이 방법 외에도 스위치 on 각 θ_{on} 와 스위치 off 각 θ_{off} 가 있어 제어의 가변성이 매우 높다. 이를 살펴보면 다음과 같다.

A. 고정된 전원전압과 스위칭각을 갖는 경우

전원전압을 변화시켜 직권전동기의 특성을 얻을 수 있으며, 이때 최대 한계치는 최대 정격전압에 의해 설정된다. 속도가 감소하면 자속은 증가하고 기저속도(base speed) ω_b 는 최대전압에서 최대 자속에 대응하는 값으로 정의된다. 기저속도는 최대출력을 얻을 수 있는 최저속도가 되고 최대 토크를 발생시킬 수 있는 최고 속도가 된다.

B. ω_b 이하에서의 속도제어

직류직권전동기와 유사하게 가변전압을 사용하여 유효인가전압을 바꾸거나, 주 스위치 소자를 사용한 초핑(chopping) 동작에 의해 얻을 수 있다.

직류기에서와 같이 전동기의 상전류를 제한함으로써 정토크특성을 얻을 수 있고, 상전류는 히스테리시스 방법이나 PWM 방법을 이용한 전류초핑에 의해 제어된다. 그러나 전류초핑에 의해 제어하는 모드는 스위칭손실이 크게 증가하여 저속일수록 효율이 떨어진다.

C. ω_b 이상에서의 제어

토크는 ω^2 에 반비례하여 감소하지만 이것은 스위칭각($\theta_{on}-\theta_{off}$)의 조정에 의해 보상이 가능하다. 여기서 스위칭각의 증가는 주로 선행스위칭각의 증가에 의해 이루어진다. 그러므로 전속도 범위에 걸쳐 정출력을 얻을 수 있다.

SRM 드라이브의 기본적인 운전특성은 그림 2에서 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 인가전압의 적절한 제어를 통하여 일정속도운전도 가능하다.

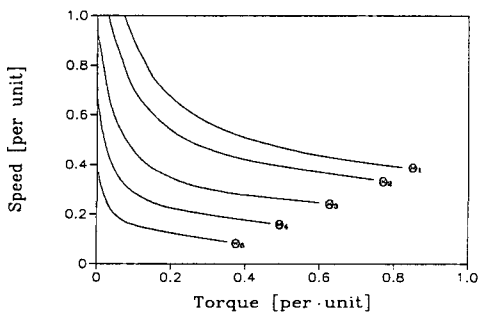


그림 2 각 스위칭각에 대한 속도-토크 특성
Fig. 2 Speed-torque curves to constant torque angle

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

본 논문에서는 SRM이 고효율로 구동되는 운전조건을 기초적인 실험을 통하여 구한 데이터를 바탕으로 신경회로망과 유전자 알고리즘을 사용한 탐색 알고리즘을 사용하여 최적 운전점을 찾고자 한다.

3. 제어알고리즘의 적용

신경회로망은 생물학적 뉴런(Neuron)의 가장 기본적인 기능과 유사한 기능을 가진 요소들로 구성

되어 있어 뇌와 유사한 많은 특성을 보유하고 있다. 즉, 경험으로부터의 학습, 앞서 주어졌던 예에서 새로운 것을 생성, 오류를 포함한 입력 데이터로부터 기본적인 특성을 추출하는 능력을 가지고 있다. 그리고 비선형 함수를 학습할 수 있는 학습능력, 왜곡되거나 잡음을 가진 입력에 대하여 바른 인식을 할 수 있는 강인성, 불완전한 입력 데이터에 의해서도 학습에 의해 일반적인 출력값을 내는 일반화 기능, 다량의 복잡한 데이터를 효과적으로 처리할 수 있는 병렬분산처리 특성 등을 가지고 있다. 특히 제어 대상 시스템이 미지의 비선형성을 갖는 경우에도 제어대상의 입출력패턴을 학습시킴으로 시스템식별을 효과적으로 할 수 있어 원하는 제어특성을 얻을 수 있다.^[5]

진화 알고리즘은 자연세계의 진화과정을 컴퓨터 상에서 시뮬레이션 함으로써 복잡한 실제세계의 문제를 해결하고자 하는 계산모델이다. 진화 알고리즘은 구조가 간단하고 방법이 일반적이어서 응용범위가 매우 넓으며, 특히 적응적 탐색과 학습 및 최적화를 통한 공학적인 문제의 해결에 많이 이용된다. 특히 탐색능력이 뛰어나고, 국부수렴을 극복하기가 쉬워서 최근에는 신경망, 퍼지 로직과의 결합으로 그 응용범위는 점점 늘어나고 있는 추세이다.^[6]

SRM의 고효율로 운전하기 위해 비선형 시스템에서 우수한 성능을 보이고 있는 신경회로망을 이용하여 On각과 입력 전압과 토크, 속도에 대한 효율의 관계를 관측하고자 한다.

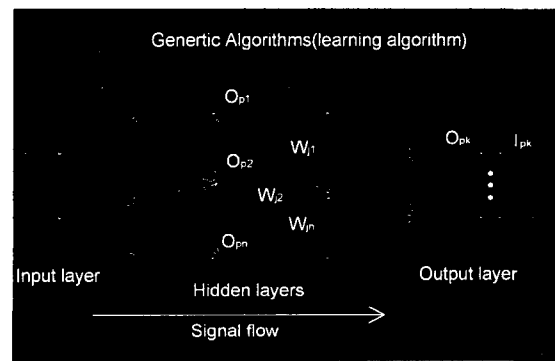


그림 3 학습 알고리즘의 블록도
Fig. 3 Block diagram of training algorithm

그림 3은 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 GA가 처리하도록 되어 있다.

신경회로망은 입력되는 데이터의 수가 적으면 학

습되지 않은 전류값에서의 오차를 가져올 가능성이 있고, 입력데이터가 많으면 학습시간이 오래 걸리는 단점이 있다. 그리고 은닉층의 개수와 뉴런의 개수에 의해서도 오차를 가져올 수가 있다. 따라서 국부수렴을 피하고 탐색능력이 뛰어난 GA를 사용하여 신경회로망의 단점을 보완하였다.

그림 4는 스위칭 각에 따른 운전특성을 측정하고 해석하기 위해 적용한 측정시스템의 구성을 보여주고 있다.

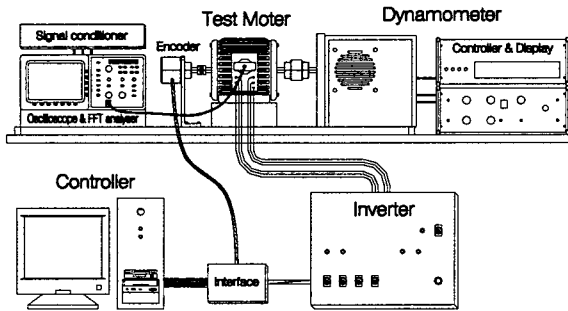


그림 4 실험장치
Fig. 4 Test equipment

인버터는 각 상권선을 독립적으로 제어할 수 있는 클래식 인버터를 적용하였으며, 전압제어기로서 강압형 초퍼를 사용하였다. 그리고 회전자의 위치를 검출하기 위한 증분형 엔코더와 부하장치인 다이나모미터로 SRM 드라이브 시스템을 구성하였다.

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

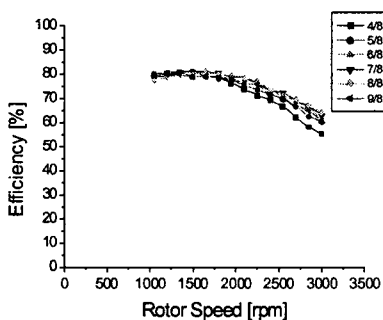


그림 5 기초실험 데이터
Fig. 5 Basic test data

유전자 알고리즘에서 선택은 개체를 교배하여 자손을 만들 개체를 선택하는 과정으로 룰렛 선택에 의한 선택확률에 따라 짝수개가 선택되도록 하였으며, 선택확률은 25[%] 내에서 선택되도록 하였으며, 이렇게 선택된 개체는 두 개씩 교배하게 된다. 돌연변이도 돌연변이 확률에 의해 발생되도록 하였

고, 돌연변이 확률은 1[%]내에서 이루어지도록 하였다.

신경회로망에서의 입력은 부하증감을 나타내는 DC 링크전류와 속도이며 그 출력으로는 그때의 부하와 속도에 고효율 즉, 최적운전조건인 스위치 온/오프각으로 하였다.

4. 결론

SRM 드라이브의 동작은 펄스 전압의 인가와 자기포화가 심한 영역에서 운전되므로 인덕턴스가 비선형적으로 변화하여 그 동작특성을 예측하여 전 운전 영역에서 최적 운전을 하기가 어렵다. 이를 극복하기 위하여 비선형 시스템에 적합한 제어알고리즘이 고려되어야 한다.

본 논문에서는 비선형 시스템에 우수한 특성을 가진 것으로 알려진 신경회로망과 유전자 알고리즘을 이용하여 임의의 속도와 부하에서도 고효율 운전이 가능하도록 스위치 온/오프각을 조정하기 위한 제어시스템 모델을 제시하였다. 이에 대한 실험 결과는 차후에 제시하고 제어알고리즘이 적용된 후 향상된 점을 논의하고자 한다.

이 연구는 BB21 Project 지원에 의하여 수행되었음.

참고 문헌

- [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., pp472-489, vol. 39, No.6, 1992.
- [6] Zbigniew Michalewicz, *Genetic Algorithms+Data Structures=Evolution Programs Second Edition*, Springer-Verlag 1992