

## 적응 FNN 제어기에 의한 SynRM 드라이브의 최대토크 제어

고재섭\*, 최정식, 이정호, 김중관, 박병상, 박기태, 정동화  
 순천대학교 전기제어공학과

### Maximum Torque Control of SynRM Drive with Adaptive FNN Controller

Jae-Sub Ko, Jung-Sik Choi, Jung-Ho Lee, Jong-Kwan Kim, Ki-Tae Park, Dong-Hwa Chung  
 Suncheon national University Major of Electrical Control Engineering

**Abstract** - The paper is proposed maximum torque control of SynRM drive using adaptive fuzzy neural network(A-FNN) controller and artificial neural network(ANN). For each control mode, a condition that determines the optimal d-axis current  $i_d$  for maximum torque operation is derived. The proposed control algorithm is applied to SynRM drive system controlled A-FNN and ANN controller, the operating characteristics controlled by maximum torque control are examined in detail. Also, this paper is proposed the analysis results to verify the effectiveness of the A-FNN and ANN controller.

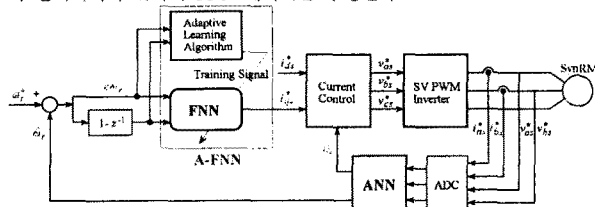
#### 1. 서 론

최근 SynRM(Synchronous Reluctance Motor)은 많은 연구자들의 노력에 의해 관심을 증폭시키고 있으며[1] 교류전동기를 대체하여 적용이 가능한 장점이 인식되었다. 벡터제어 SynRM 드라이브는 고속 운전을 위한 약계자 제어가 필수적이며 회전자 속도를 증가시켜 자속전류를 감소시키면 자속을 쉽게 약화시킬 수 있다.[2] 전동기에 의해 발생한 최대토크는 허용 가능한 인버터의 전류정격 및 최대전압에 의존한다.[3] 따라서 전압과 전류 제한을 고려하여 전 속도 영역에서 MTPA(Maximum Torque per Ampere)가 가능한 제어기법을 사용할 필요가 있다.

본 논문에서는 더욱 고성능 및 강인성 제어를 하기 위하여 A-FNN(Adaptive FNN) 제어기를 설계한다. 이 제어기를 이용하여 제한 전압과 전류에서 전 고속영역에 최대토크 동작이 가능한 SynRM 드라이브를 위한 최대토크 제어를 제시한다. 정격속도 이하에서는 일정 토크영역으로 운전하고 정격속도 이상에서는 절환하여 일정 출력영역으로 운전한다. 본 논문에서 제시한 알고리즘을 응답성능을 구하고 그 결과를 제시한다.

#### 2. A-FNN 제어기

SynRM 드라이브 시스템을 위한 A-FNN 제어기 및 ANN은 그림 1과 같다. FNN 제어기는 드라이브 시스템의 동작을 관측하고 요구되는 지령치로 실제 성능을 비교한다. 학습 메카니즘은 요구되는 시스템 동작으로 거의 일치시키기 위하여 FNN 제어기를 수정한다.



〈그림 1〉 A-FNN 및 ANN 제어기

$$e(kT) = \omega_r^*(kT) - \hat{\omega}_r(kT) \quad (1)$$

$$ce(kT) = e(kT) - e(kT - T) \quad (2)$$

지식베이스의 수정자는  $p(kT)$ 에 따라서 FNN 제어기의 지식베이스를 변화시킨다. 이 변화는 FNN 제어기에서 출력의 멤버십 함수의 중앙을 수정하여 구현한다.

$$C_i(kT) = C_i(kT - T) + p(kT) \quad (3)$$

여기서 첨자  $i$ 는 역모델에 의해 동작하는  $i$ 번째 멤버십 함수를 나타낸다.

#### 3. ANN에 의한 속도추정

ANN을 이용한 시스템의 추정에서 구한 최종 추정속도는 다음 식과 같다.

$$\begin{aligned} \hat{\omega}_r(k+1) &= \hat{\omega}_r(k) + \Delta\hat{\omega}_r(k) \\ &= \hat{\omega}_r(k) - \frac{\Delta W_2(k)}{T} \\ &= \hat{\omega}_r(k) - \frac{\eta}{T} \left\{ \frac{1}{c} [i_{qm}(k) - \hat{i}_{qm}(k)] \hat{i}_{dm}(k-1) \right. \\ &\quad \left. - [i_{dm}(k) - \hat{i}_{dm}(k)] \hat{i}_{qm}(k-1) \right\} - \frac{\alpha}{T} \Delta W_2(k-1) \end{aligned} \quad (5)$$

여기서  $T$ 는 샘플링 주기,  $\eta$ 는 학습계수를 나타낸다. 계수  $\alpha$ 는 현재 하중에서 변동하는 과거 하중의 영향을 결정한다.

추정속도를 이용하여 회전자 자극의 위치는 다음과 같다.

$$\hat{\theta}(k+1) = \hat{\theta}(k) + T \cdot \hat{\omega}_r(k) \quad (5)$$

#### 4. 약계자 제어

##### 4.1 전압과 전류 제한

기준전압  $V_d^*$ 와  $V_q^*$ 과 전류 제한 조건은 다음 조건을 만족한다.

$$V_d^{*2} + V_q^{*2} \leq V_{smax}^2 \quad (6)$$

$$i_d^{*2} + i_q^{*2} \leq i_{smax}^2 \quad (7)$$

전압과 전류를 평면상에 나타내면 그림 2와 같다.

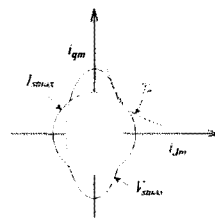
##### 4.2 약계자 제어의 동작

SynRM의 출력과 일정 전력영역의 지령 토크는 다음과 같다.

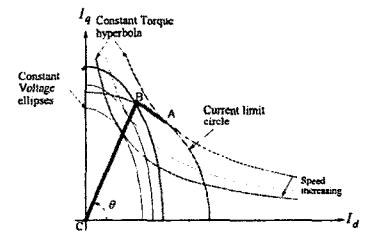
$$P_{out} = \omega_m T_e = \frac{2}{p} \omega_r T_e \quad (8)$$

$$T_e^* = \frac{P \cdot P_{out}}{2 \omega_r} = \frac{T_e^* \cdot \omega_r \cdot \omega_r}{\omega_r} \quad (9)$$

약계자 제어영역에서 동작모드는 그림 3과 같이 세 개의 영역으로 구분한다.



〈그림 2〉 전압제한 타원과 전류제한 원



〈그림 3〉 SynRM의 약계자 동작

모드 I : 일정 최대토크에 의한 전류제한 영역

최대토크를 위한 최적 전류각과 전류제한에서 동작하는 최대토크를 발생시키는 속도영역이다.

모드 II : 전류와 전압의 제한영역

전동기는 A점에서 B점까지 일정 전류원을 따라 동작한다. 이 영역에서는 일정 전압타원의 크기가 감소하므로 속도는 증가하게 된다.

모드 III : 전압제한 영역

속도를 더욱 증가시키면 전류가 감소하게 되고 이 경우에 전류제한에 있는 전류를 발생시키기 위하여 일정전압은 불충분하다. 전동기는 일정 토크제적이 일정 전압타원에 접해 있는 최적조건에서 동작한다. 즉, 토크는 B점 이상의 속도에 대한 각 값에서 최대화가 된다.

#### 5. 최대토크 제어

출력 토크를 최대로 하는 조합을 구하기 위한 함수  $F$ 로 정의한다.

$$F = \frac{T_e}{k_t} = i_d \cdot i_q \quad (10)$$

$dF/di_d = 0$ 을 수행하여 최적의 기준전류를 구하고 최대토크를 구한다.

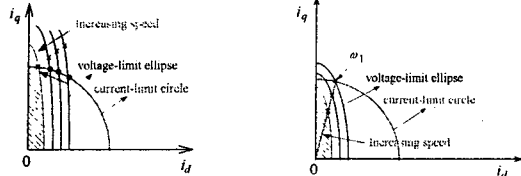
##### 5.1 약계자 영역 I ( $\omega_{base} < \omega_r < \omega_1$ )

최적의 기준 전류벡터는 운전속도의 증가에 따라 형성되는 타원과 원의 교점에 따라 원주상을 이동하게 되며 그림 4에 나타난다. 이 영역에서 운전속도의 증가에 따라 자속성분 전류가 감소되어 속도는 계속 증가한다.

##### 5.2 약계자 영역 II ( $\omega_r > \omega_1$ )

운전속도가 더욱 증가하면 타원은 더욱 감소하게 되어 결국에는 그림 5와

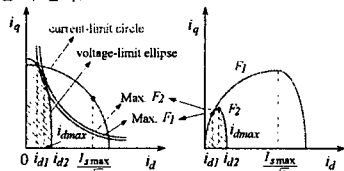
같이 타원의 대부분이 원에 포함하게 된다. 그림 5는 이 영역에서 운전속도의 증가에 따라 최적의 기준 전류벡터의 궤적을 나타낸다. 이 영역에서는 영역 I에서의와 상이하게 운전속도가 증가하면  $i_d$ 와  $i_q$ 가 동시에 감소한다.



〈그림 4〉 약계자 영역 I에서 최적 기준전류의 궤적    〈그림 5〉 약계자 영역 II에서 최적 기준전류의 궤적

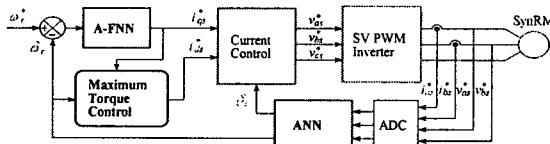
### 5.3 최적의 기준전류

전류 및 전압 제한식을 동시에 만족하는 기준전류의 영역은 그림 8의 빗금친 부분으로 나타낼 수 있다.  $dF/di_d=0$ 을 수행하여 최적의 기준전류를 구하고 최대토크를 구한다.



〈그림 6〉 최적 기준전류

그림 7은 SynRM의 최대토크 제어의 블록도를 나타낸다. ANN에 의해 속도와 위치를 추정하고 최대토크 제어에 의해 각 운전영역에서 최대토크가 되는  $i_d$ 를 구하여 운전한다.

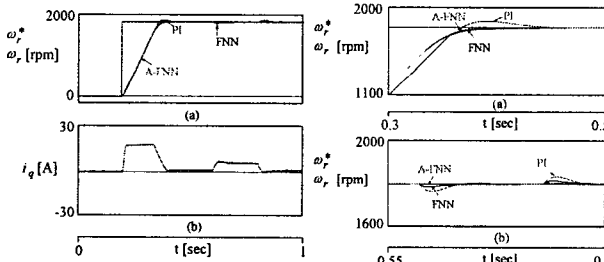


〈그림 7〉 SynRM의 최대토크 제어 시스템

## 6. 시스템 운전과 결과

그림 8은 0.2[sec]에서 스탭 지령속도를 1800[rpm]으로 운전 중, 0.6[sec]에서 0.8[sec]까지 부하토크를 3[N·m]로 인가하였을 경우의 응답특성이다. 이 경우 PI, A-FNN 제어기의 응답특성을 비교하였다.

그림 9는 그림 8의 응답특성을 명확하게 분석하기 위하여 확대한 그림이다.

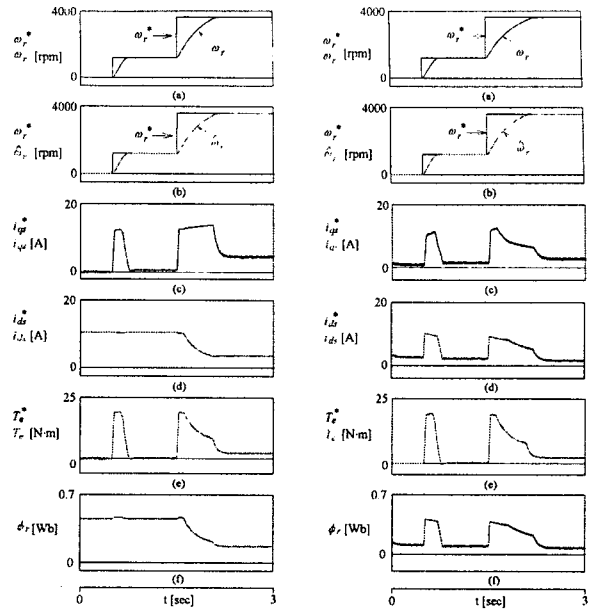


〈그림 8〉 PI, FNN 및 A-FNN 제어기의 응답특성의 비교    〈그림 9〉 초기와 부하인가에 대한 제어기의 응답특성의 비교

그림 10은 팬 부하를 인가 시켰을 때 지령속도를 0.5[sec] 후에 1200[rpm], 1.5[sec]후에 3600[rpm]으로 속도를 변화시켰을 때의 IRS의 응답특성을 나타낸다. 그림 10(a)는 지령속도와 실제속도를 나타내고 그림 10(b)는 지령속도와 추정속도를 나타낸다. 추정속도는 실제속도에 양호하게 추종하고 있다. 그림 10(c)는 지령 q축 전류와 실제 q축 전류를 나타내고 그림 10(d)는 지령 d축 전류와 실제 d축 전류를 나타낸다. 약계자 영역에서 자속분 전류인 d축 전류는 감소되고 일정전력을 발생시키기 위하여 q축 전류는 증가되고 있다. 그림 10(e)는 발생토크를 나타내고 그림 10(e)는 자속을 나타낸다.

그림 11은 그림 10과 같은 조건에서 최대토크 제어의 응답특성을 나타낸다. 속도, 토크 및 자속의 응답특성은 IRS와 거의 유사하게 나타나고 있다. 그러나 그림 11(c)와 그림 11(d)의 d-q축 전류는 전류 제한 범위에서 최대토크 제어의 위상각을 만족하는 전류가 발생되므로 q축 전류와 d축 전류가 감소되고 있다. 이는 최대토크 제어에서 전류의 감소에 따라 토크가 증가하고 있는 현상을 나타내고 있다. 따라서 속도 변화에서도 최대토크 제어가 양호하게 수행됨을 알 수 있다.

그림 10과 11 (a), (b)에서 ANN에 의한 추정속도  $\hat{\omega}_r$ 는 실제속도  $\omega_r$ 에 양호하게 추종하고 있다.

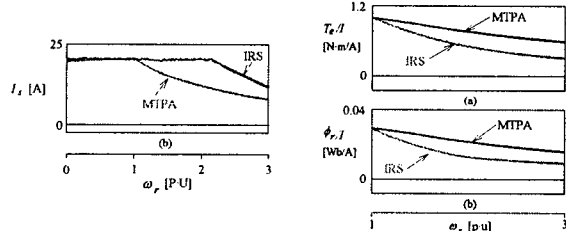


〈그림 10〉 속도변화에 의한 IRS의 응답특성

〈그림 11〉 속도변화에 의한 최대토크 제어의 응답특성

그림 12에서 약계자 영역에서 최대토크 제어 제어의 전체 전류가 IRS 보다 작은 값으로 나타나므로 최대토크 제어의 효과가 나타난다.

그림 13은 약계자 영역에서 최대토크 제어와 IRS의 단위 전류당 토크와 자속의 비교를 나타낸다. 그림 13(a)는 단위전류당 토크를 비교한 결과를 나타내며 본 연구에서 제시한 최대토크 제어가 종래의 IRS 보다 토크가 크게 나타나고 있다. 그림 13(b)는 단위 전류당 자속을 비교한 결과이며 최대토크 제어가 종래의 IRS 보다 자속이 크게 나타나고 있다.



〈그림 12〉 IRS와 최대토크 제어의 전체 전류 비교    〈그림 13〉 IRS와 최대토크 제어의 응답 비교

## 7. 결 론

약계자를 위하여 종래에 많이 사용되었던 IRS 제어는 회전속도에 반비례하는 기준 회전자 자속을 변화시킨다. 그러나 이 방법에서는 단지 전류제한만 고려하였으므로 드라이브 시스템의 최대 토크능력을 완전하게 사용하지 못한다.

본 논문에서는 전압과 전류조건에서 고속영역에서 SynRM의 최대 토크 능력을 유지할 수 있는 새로운 약계자 방식을 제시하였다. 드라이브 시스템은 정격속도 이하에서는 일정 토크영역으로 운전하고 정격속도 이상에서는 약계자 영역인 일정 전력영역으로 운전하였다. 또한 A-FNN 제어기를 이용하여 고성능 속도제어를 이룩할 수 있었으며 ANN을 사용하여 센서리스 제어에 의해 속도를 추정하였다.

최대토크 제어 제어는 기존의 IRS 제어와 다양한 조건의 약계자 영역에서 운전 특성비교하면 동일한 응답 특성을 나타내지만 d-q축 전류가 감소하고 있다. 그리고 속도의 증가에 대한 토크와 출력은 같지만 전체 전류의 감소로 단위 전류당 토크가 매우 증가되고 있다. A-FNN 제어기는 종래의 PI 제어기에 비해 오버슈트가 작게 나타나고 상승시간이 짧고 빠르게 정상상태에 도달하였다. ANN에 의한 속도추정도 양호하게 나타났다. 따라서 본 연구에서 제시한 최대토크 제어 방법의 타당성을 입증할 수 있었다.

## 〔참 고 문 헌〕

- [1] T. A. Lipo, "Synchronous reluctance machines: A viable alternative for A.C. drives?," in Proc. Int. Conf. Evolution and Modern Aspects of Synchronous Machines, Zurich, Switzerland, Aug., pp. 27-29, 1991.
- [2] T. Senjyu, T. Shingaki and K. Uezato, "A high efficiency control strategy for synchronous reluctance motor considering stator iron loss with EKF," in Proc. ICEE 2000, Kitakyushu, Japan, pp. 179-182, 2000.
- [3] M. Ali Unar, D. J. Murray-Smith and S. F. Ali Shah, "Design and tuning of fixed structure PID controller - A survey," Technical Report CSC-96016, Faculty of Engineering, Glasgow University, Scotland, 1996.