

ALM-FNN 제어기에 의한 SynRM 드라이브의 최대토크 제어

고재섭, 최정식, 이정호, 김종관, 박기태, 박병상, 정동화  
 순천대학교 공과대학 정보통신공학부

Maximum Torque Control of SynRM Drive with ALM-FNN Controller

Jung Sik Choi, Jae Sub Ko, Jung Ho Lee, Jong Kwan Kim, Ki Tae Park, Byung Sang Park, Dong-Hwa Chung  
 School of Information & Communication Engineering, Sunchon National Univ.

**Abstract** - The paper is proposed maximum torque control of SynRM drive using adaptive learning mechanism-fuzzy neural network(ALM-FNN) controller and artificial neural network(ANN). The control method is applicable over the entire speed range and considered the limits of the inverter's current and voltage rated value. 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 ALM-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 ALM-FNN and ANN controller.

FNN 제어기에 학습 메카니즘을 적용하여 룰 베이스의 규칙을 수정한다.

$$em(kT) = \omega_m(kT) - \hat{\omega}_r(kT) \quad (1)$$

$$cem(kT) = em(kT) - em(kT - T) \quad (2)$$

여기서 오차  $em(kT)$ 는 각 시간순서에서 얻어지는 필요한 속도 성능의 측정 정도이다. 프로세서에서 변화  $p(kT)$ 는 입력오차  $em(kT)$ 에 기초하여 퍼지 역모델에 의해서 발생한다.

지식베이스의 수정자는  $p(kT)$ 에 따라서 FNN 제어기의 지식베이스를 변화시킨다.

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

1. 서 론

SynRM은 회전자 설계를 개선하여 유도전동기 보다 역률과 효율면에서 우수하며[1],[2] 백터제어 기법에 의한 제어성능이 다른 고성능 교류전동기 보다 양호하다는 것이 입증되었다.[3]

백터제어 SynRM 드라이브는 고속 운전을 위한 약계자 제어가 필수적이며 회전자 속도를 증가시켜 자속전류를 감소시키면 자속을 쉽게 약화시킬 수 있다.[4] 전동기에 의해 발생한 최대토크는 허용 가능한 인버터의 전류정격 및 최대전압에 의존한다.[5] 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 ALM-FNN제어기를 설계한다. 이 제어기를 이용하여 제한 전압과 전류에서 전 고속영역에 최대토크 동작이 가능한 SynRM 드라이브를 위한 최대토크 제어를 수행하여 본 논문에서 제시한 알고리즘을 응답성능을 구하고 그 결과를 제시한다.

2. ALM-FNN 제어기

SynRM 드라이브 시스템을 위한 ALM-FNN 제어기 및 ANN은 그림 1과 같다.

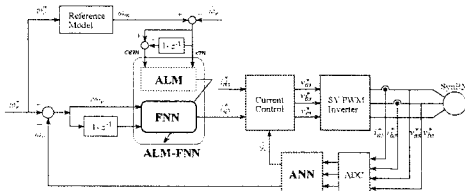


그림 1 ALM-FNN 및 ANN 제어기

3. ANN에 의한 속도추정

ANN은 인간 두뇌의 간단한 모델에 의해 사고하는 구조로 된 컴퓨팅 시스템이다. ANN은 비선형 동적 시스템의 파라미터를 추정 및 제어를 하는데 사용된다.

ANN을 이용한 시스템의 추정에서 구한 최종 추정속도는 다음 식과 같다.

$$\hat{\omega}_r(k+1) = \hat{\omega}_r(k) + \Delta\hat{\omega}_r(k)$$

$$= \hat{\omega}_r(k) - \frac{\Delta W_{21}(k)}{T}$$

$$= \hat{\omega}_r(k) - \frac{\eta}{T} \left\{ \frac{1}{c} [i_{qm}(k) - \hat{i}_{qm}(k)] i_{dm}(k-1) \right.$$

$$\left. - c [i_{dm}(k) - \hat{i}_{dm}(k)] i_{qm}(k-1) \right\} - \frac{\alpha}{T} \Delta W_{22}(k-1) \quad (4)$$

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

본 논문에서는 공간 전압벡터 PWM을 사용하며 최대 고정자전압  $V_{s,max}$ 는  $V_{sk}/\sqrt{3}$ 이다. 이와 같은 조건하에서 기준전압  $V_d^*$ 와  $V_q^*$ 는 다음 조건을 만족한다.

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

전류 제한조건은 다음 식과 같다.

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

전압과 전류를 평면상에 나타내면 그림 2와 같다.

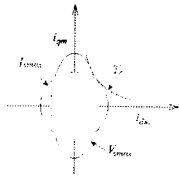


그림 2 전압제한 타원과 전류제한 원

## 4.2 약계자 제어의 동작

전압제한 타원은 약계자 영역 중 고속영역에서 고려하였고 그림 3의 최대토크 곡선과 전류제한 원의 교점은 일정 토크영역과 약계자 제어영역의 전환점이 된다.

SynRM의 출력과 일정 전력영역의 지령 토크는 다음과 같다.

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

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

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

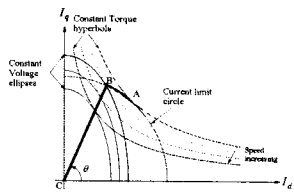


그림 3 SynRM의 약계자 동작

모드 I : 일정 최대토크에 의한 전류제한 영역

최대토크를 위한 최적 전류각과 전류제한에서 동작하는 최대토크를 발생하는 저속영역이다.

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 전류제한에 있는 전류를 발생시키기 위하여 일정전압은 불충분하다. 전동기는 일정 토크제적이 일정 전압타원에 접해 있는 최적조건에서 동작한다.

## 5. 최대토크 제어

전압과 전류 제한조건을 동시에 만족시키기 위한 기준 전류벡터는 그림 4의 운전 속도에서 타원과 원의 공통영역에 존재하는  $i_q$ 와  $i_d$ 의 조합 중에서 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.

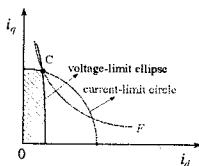


그림 4 제시된 방법에서 기준전류

최대 토크를 위한 최적의  $i_q$ 와  $i_d$ 의 조합을 구할 경우 영향을 주는 제한조건에 따라 약계자 영역은 두 구간으로 나누어진다.

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

이 영역의 범위는 기준속도  $\omega_{base}$ 로부터 최대 속도에 도달할 때까지의 속도  $\omega_1$ 이다. 그림 4의 운전 가능영역에서 함수  $F$ 를 최대로 하는 점은 C점이다. 최적의 기준 전류벡터는 운전속도의 증가에 따라 원주상을 이동하게 되며 그림 5에 나타난다. 이 영역에서 운전속도의 증가에 따라 자속성분 전류가 감소되어 속도는 계속 증가한다. 전류제어기가 포화가 시작되는 점은 전압과 전류 제한조건에 따라 다르게 나타나기 때문에 기준속도는 이러한 제한조건에 따라 조절해야 한다.

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

운전속도가 더욱 증가하면 타원은 더욱 감소하게 되어 결국에는 그림 6과 같이 타원의 대부분이 원에 포함하게 된다.  $\omega_1$  이상의 운전속도에 대해서는 전압 제한조건만 출력토크에 영향을 준다. 그림 6은 이 영역에서 운전속도의 증가에 따라 최적의 기준 전류벡터의 궤적을 나타낸다. 이 영역에서는 영역 I에서와는 상이하게 운전속도가 증가하면  $i_d$ 와  $i_q$ 가 동시에 감소한다.

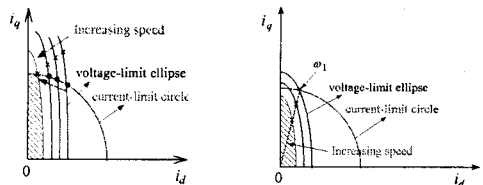


그림 5 약계자 영역 I에서 최적 기준전류의 궤적 그림 6 약계자 영역 II에서 최적 기준전류의 궤적

### 5.3 최적의 기준전류

전류 및 전압 제한식을 동시에 만족하는 기준전류의 영역은 그림 7의 빗금친 부분으로 나타낼 수 있다.  $dF/di_d = 0$ 을 수행하여 최적의 기준전류를 구하고 최대토크를 구한다.

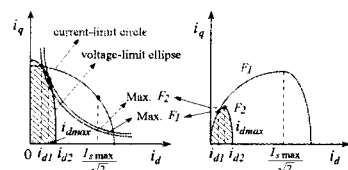


그림 7 최적 기준전류

그림 8는 SynRM의 최대토크 제어의 블록도를 나타낸다. ANN에 의해 속도와 위치를 추정하고 최대토크 제어에 의해 각 운전영역에서 최대토크가 되는  $i_d$ 를 구하여 운전한다.

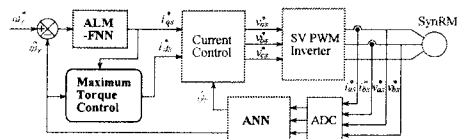


그림 8 SynRM의 최대토크 제어 시스템

## 6. 시스템 운전과 결과

그림 9는 0.2[sec]에서 스텝 지령속도를 1800[rpm]으로 운전 중, 0.6[sec]에서 0.8[sec]까지 부하토크를 3[N·m]로 인가하였을 경우의

PI, ALM-FNN 제어기의 응답특성을 비교하였다.

그림 10은 그림9의 응답특성을 명확하게 분석하기 위하여 확대한 그림이다. ALM-FNN 제어기가 FNN 및 PI 제어기 보다 오버슈트도 작고 빠르게 안정화하여 성능이 양호하게 나타나고 있다.

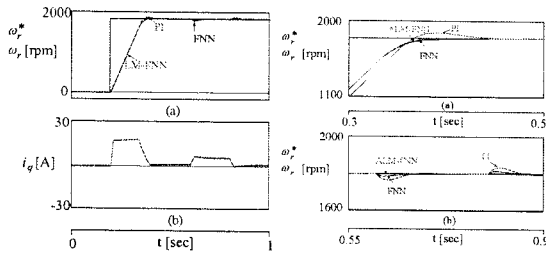


그림 9 PI, FNN 및 ALM-FNN 제어기의 응답 특성의 비교      그림 10 초기와 부하인가에 대한 제어기의 응답 특성의 비교

그림 11은 팬 부하를 인가 시켰을 때 지령속도를 0.5[sec] 후에 1200[rpm], 1.5[sec]후에 3000[rpm]으로 속도를 변화시켰을 때의 IRS의 응답특성을 나타낸다. 그림 (c)는 지령  $q$  축 전류와 실제  $q$  축 전류를 나타내고 그림 (d)는 지령  $d$  축 전류와 실제  $d$  축 전류를 나타낸다. 약제자 영역에서 지속분 전류인  $d$  축 전류는 감소되고 일정전력을 발생시키기 위하여  $q$  축 전류는 증가되고 있다.

그림 12는 그림 11과 같은 조건에서 최대토크 제어의 응답특성을 나타낸다. 속도, 토크 및 자속의 응답특성은 IRS와 거의 유사하게 나타나고 있다. 그러나 그림 12(c)와 그림 (d)의  $d-q$  축 전류는 전류 제한 범위에서 최대토크 제어의 위상각을 만족하는 전류가 발생되므로  $q$  축 전류와  $d$  축 전류가 감소되고 있다. 이는 최대토크 제어에서 전류의 감소에 따라 토크가 증가하고 있는 현상을 나타내고 있으며 그림 11과 12(a), (b)에서 ANN에 의한 추종 속도  $\hat{\omega}_r$ 는 실제 속도  $\omega_r$ 에 양호하게 추종하고 있다.

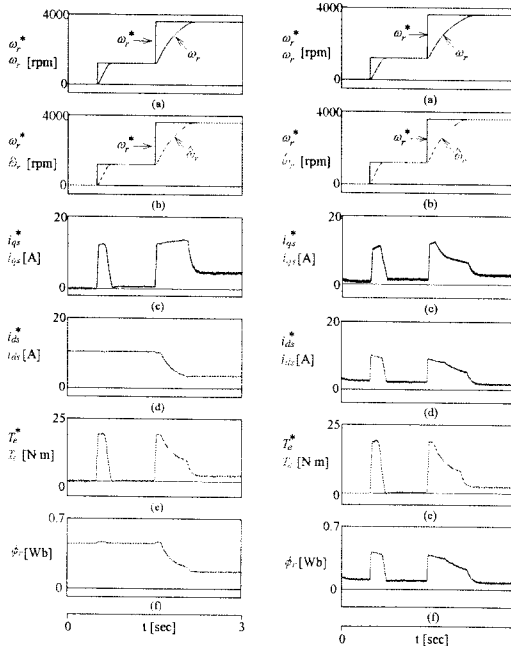


그림 11 속도변화에 의한 IRS의 응답특성      그림 12 속도변화에 의한 최대토크 제어의 응답특성

그림 13에서 약제자 영역에서 최대토크 제어 제어의 전체 전류가 IRS 보다 작음으로 나타나므로 최대토크 제어의 효과가 나타난다. 그림 14는 약제자 영역에서 최대토크 제어와 IRS의 단위

전류당 토크와 자속의 비교를 나타낸다. 그림 14(a)는 단위 전류당 토크를 비교한 결과를 나타내며 본 연구에서 제시한 최대토크 제어가 종래의 IRS 보다 토크가 크게 나타나고 있다. 그림 (b)는 단위 전류당 자속을 비교한 결과이며 최대토크 제어가 종래의 IRS 보다 자속이 크게 나타나고 있다.

따라서 본 연구에서 제시한 최대토크 제어의 응답특성이 양호하며 단위 전류당 최대토크도 크게 나타난다.

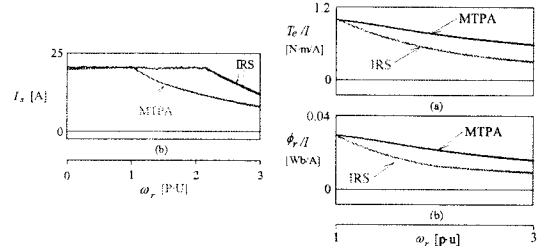


그림 13 IRS와 최대토크 제어의 전체 전류 비교      그림 14 IRS와 최대토크 제어의 응답 비교

## 7. 결 론

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

최대토크 제어는 기존의 IRS 제어와 다양한 조건의 약제자 영역에서 운전 특성비교하면 동일한 응답 특성을 나타내지만  $d-q$  축 전류가 감소하고 있다. 그리고 속도의 증가에 대한 토크와 출력은 같지만 전체 전류의 감소로 단위 전류당 토크가 매우 증가되고 있다. ALM-FNN 제어기는 종래의 PI 제어기에 비해 오버슈트가 작게 나타나고 상승시간이 빠르고 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. Matsuo and T. A. Lipo, "Rotor design optimization of synchronous reluctance machine," IEEE Trans. Energy conversion, vol. 9, no. 2, pp. 359-365, 1994.
- [2] A. Staton, T. J. E. Miller and S. E. Wood, "Optimization of the synchronous reluctance motor geometry," in Conf. Rec. Electrical machines and Drives, London, UK, pp. 156-160, 1991.
- [3] T. Matsuo and T. A. Lipo, "Field oriented control of synchronous reluctance machine," in Conf. Rec. IEEE Power Electron Specialists Conf., pp 425-431, 1993.
- [4] 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.
- [5] 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.