

## AFNIS를 이용한 SynRM의 최대토크 제어

정병진, 고재섭, 최정식, 정철호, 김도연, 정동화  
 순천대학교 공과대학 정보통신공학부

### Maximum Torque Control of SynRM using AFNIS(Adaptive Fuzzy Neuro Inference)

Byung-Jin Jung, Jae-Sub Ko, Jung-Sik Choi, Chul-Ho Jung, Do-Yeon Kim, Dong-Hwa Chung  
 School of Information & Communication Engineering, Suncheon National Univ.

**Abstract** - The paper is proposed maximum torque control of SynRM drive using adaptive fuzzy neuro inference system(AFNIS) 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 AFNIS 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 AFNIS and ANN controller.

#### 1. 서 론

SynRM은 회전자 설계를 개선하여 유도전동기보다 역률과 효율면에서 우수하며[1] 벡터제어 기법에 의한 제어성능이 다른 고성능 교류전동기보다 양호하다는 것이 입증되었다.[2]

산업 프로세서의 적용에는 부하 외란, 파라미터 변화 및 어떤 모델의 불확실성 등에 대하여 고성능과 강인성을 발휘할 수 있는 기법이 필요하다. 벡터제어 SynRM 드라이브는 고속 운전을 위한 약계자 제어가 필수적이며 회전자 속도를 증가시켜 자속전류를 감소시키면 자속을 쉽게 약화시킬 수 있다.[3] 전동기에 의해 발생된 최대토크는 허용 가능한 인버터의 전류정격 및 최대전압에 의존한다.[4] 따라서 전압과 전류 제한을 고려하여 전속도 영역에서 MTPA(Maximum Torque per Ampere)가 가능한 제어기법을 사용할 필요가 있다.

본 논문에서는 더욱 고성능 및 강인성 제어를 하기 위하여 AFNIS(Adaptive Fuzzy Neuro Inference System) 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. AFNIS

SynRM 드라이브 시스템을 위한 AFNIS 및 ANN은 그림 1과 같다. FNIS는 드라이브 시스템의 동작을 관측하고 요구되는 지령치로 실제 성능을 비교한다. 학습 매카니즘은 요구되는 시스템 동작으로 거의 일치시키기 위하여 FNIS 제어기를 수정한다. FNN의 입력은 속도오차  $e$  및 속도오차의 변화분  $ce$  이다. FNIS의 출력  $\Delta i_{qs}^*$ 는 중심 비퍼지화 방법에 의해 계산한다. 이전 출력  $i_{qs}^*(k-1)$ 에 출력  $\Delta i_{qs}^*(k)$ 를 합하여 최종  $i_{qs}^*(k)$ 를 얻고 이를 전동기의 입력으로 한다.

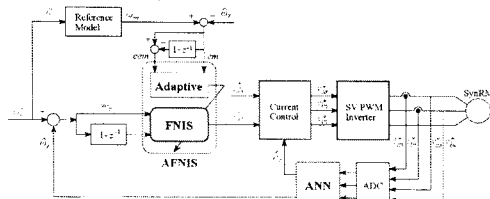


그림 1 AFNIS 및 ANN 제어기

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

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

여기서 오차  $em(kT)$ 는 각 시간순서에서 얻어지는 필요한 속도성능의 측정 정도이다. 퍼지 역모델은 오차  $em(kT)$ 를 사상하여 프로세서의 입력  $p(kT)$ 를 변화시키며  $em(kT)$ 를 영이 되도록 강제화 시킨다. 역모델의 입력은 식(1)과 식(2)와 같이 오차와 오차 변화분으로 정의한다. 퍼지의 수행과정은 FNN 제어기에서 사용한 방법과 유사하게 사용한다. 프로세서에서 변화  $p(kT)$ 는 입력오차  $em(kT)$ 에 기초하여 퍼지 역모델에 의해서 발생한다.

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

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

#### 3. ANN에 의한 속도추정

ANN을 이용한 시스템의 추정에서 구한 최종 추정속도 및 추정 회전자 자극의 위치는 다음 식과 같다.

$$\begin{aligned} \hat{\omega}_r(k+1) &= \hat{\omega}_r(k) + \Delta \hat{\omega}_r(k) \\ &= \hat{\omega}_r(k) - \frac{\Delta W_2(k)}{T} \\ &= \hat{\omega}_r(k) - \frac{\eta}{T} \left\{ \frac{1}{c} [i_{qm}(k) - \hat{i}_{qm}(k)] \hat{i}_{dm}(k-1) \right. \\ &\quad \left. - c [i_{dm}(k) - \hat{i}_{dm}(k)] \hat{i}_{qm}(k-1) \right\} - \frac{\alpha}{T} \Delta W_2(k-1) \end{aligned} \quad (4)$$

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

#### 4. 약계자 제어

##### 4.1 전압과 전류 제한

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

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

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

전압과 전류를 평면상에 나타내면 그림 2와 같다.

##### 4.2 약계자 제어의 동작

전압과 전류의 제한조건을 모두 고려할 경우 약계자 영역의 제어 가능한 기준전류의 영역은 전압제한 타원과 전류제한 원의 공통영역이다. 그림 3의 최대토크 곡선과 전류제한 원의 교점은 일정 토크영역과 약계자 제어영역의 전환점이 된다.

SynRM의 출력과 일정 전력영역의 지령 토크는 다음과 같다.

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

$$T_e^* = \frac{P \cdot P_{out}}{2} \cdot \frac{1}{\omega_r} = \frac{T_e^* \cdot \omega_r \cdot \text{rate}}{\omega_r} \quad (9)$$

지령 토크가 변화하는 약계자 제어영역에서 동작모드는 그림 4와 같이 세 개의 영역으로 구분한다.

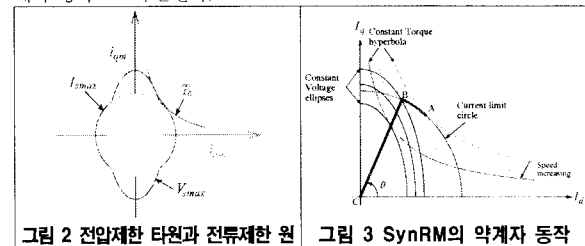


그림 2 전압제한 타원과 전류제한 원

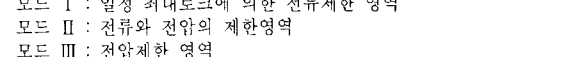


그림 3 SynRM의 약계자 동작

모드 I : 일정 최대토크에 의한 전류제한 영역

모드 II : 전류와 전압의 제한영역

모드 III : 전압제한 영역

#### 5. 최대토크 제어

전압과 전류 제한조건을 동시에 만족시키기 위한 기준 전류벡터는 그림 4의 운전 속도에서 타원과 원의 공통영역에 존재해야 한다. 이 영역에 존재하는  $i_q$ 와  $i_d$ 의 조합 중에서 출력 토크를 최대로 하는 조합을 구하기 위한 함수  $F$ 로 정의한다.

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

이 함수를 최대로 하는 기준전류를 구하면 최대토크를 발생하는 최적의 기준전류를 구할 수 있다. 즉,  $dF/di_d = 0$ 을 수행하여 최적의 기준전류를 구하고 최대토크를 구한다. 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 ( $\omega_r < \omega_1 < \omega_2$ )

이 영역의 범위는 기준속도  $\omega_{base}$ 로부터 최대 속도에 도달할 때까지의 속도  $\omega_1$ 이다. 여기서 기준속도는 약계자 운전이 시작될 때의 속도이다. 그림 5의 운전 가능영역에서 함수  $F$ 를 최대로 하는 점, 즉 출력토크를 최대로 하는 점은 전압제한 타원과 전류제한 원의 교점인 C점이다.

### 5.2 약계자 영역 II ( $\omega_r > \omega_2$ )

운전속도가 더욱 증가하면 타원은 더욱 감소하게 되어 결국에는 그림 6과 같이 타원의 대부분이 원에 포함하게 된다. 영역 II의 시작속도  $\omega_2$ 은 전압 제한조건만을 고려하였을 경우, 최대토크를 발생시키기 위한 운전 점(x점)이 타원과 원의 교점(●점)과 일치할 때 나타나는 속도이다. 따라서  $\omega_1$  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.

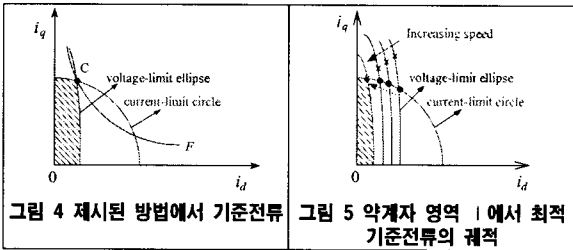


그림 4 제사된 방법에서 기준전류

그림 5 약계자 영역 I에서 최적 기준전류의 궤적

### 5.3 최적의 기준전류

전류 및 전압 제한식을 동시에 만족하는 기준전류의 영역은 그림 7의 빗금친 부분으로 나타낼 수 있다. 식(10)의 함수를 최대로 하는 기준전류를 구하면 최대토크를 발생하는 최적의 기준전류를 구할 수 있다. 즉,  $dF/di_d = 0$ 을 수행하여 최적의 기준전류를 구하고 최대토크를 구한다.

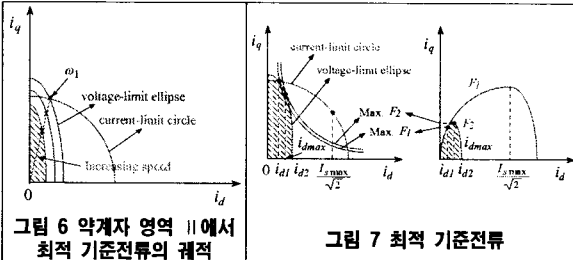


그림 6 약계자 영역 II에서 최적 기준전류의 궤적

그림 7 최적 기준전류

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

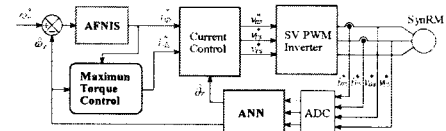


그림 8 SynRM의 최대토크 제어 시스템

## 6. 시스템 운전과 결과

그림 9은 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 응답특성이다. 이 경우 PI, AFNIS의 응답특성을 비교하였다.

그림 10은 그림 9의 응답특성을 명확하게 분석하기 위하여 확대한 그림이다. 그림 10(a)는 초기 기동상태의 응답특성이며 AFNIS는 종래의 PI 제어기 보다 응답특성이 양호하게 나타난다. 그림 10(b)는 부하인가에 따른 응답특성을 나타낸다. 이 경우에도 AFNIS가 PI 제어기 보다 오버슈트도 작고 빠르게 안정화하고 있다.

그림 11는 속도에 대한 IRS의 응답 특성을 나타낸다. 그림 11(a)는 토크와 전력, 그림 (b)는 전체 전압과 전류, 자속의 변화를 나타낸다. 일정 출력영역에서 전력은 일정하게 유지되고 속도가 증가하면 역기전력의 증가하므로 전력이 감소되며 토크와 자속은 감소된다. 전체 전류는 일정하지만 속도가 증가하면 감소되고 전압은 일정하게 유지된다.

그림 12은 속도에 대한 최대토크 제어의 응답특성 나타낸다. IRS와 비교하여 전체 전류를 제한한 다른 응답특성은 거의 유사하게 나타난다. 전체 전류

의 감소는 최대토크 제어에서 상대적으로 토크가 증가하는 형상을 나타낸다.

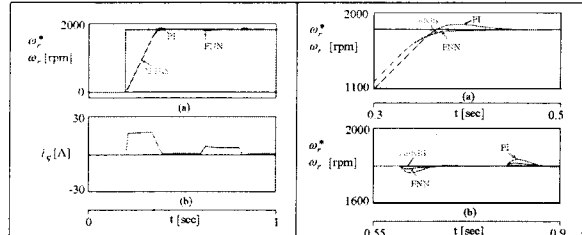


그림 9 PI, FNN 및 AFNIS의 응답특성의 비교

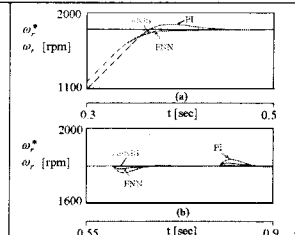


그림 10 초기와 부하인가에 대한 제어기의 응답특성의 비교

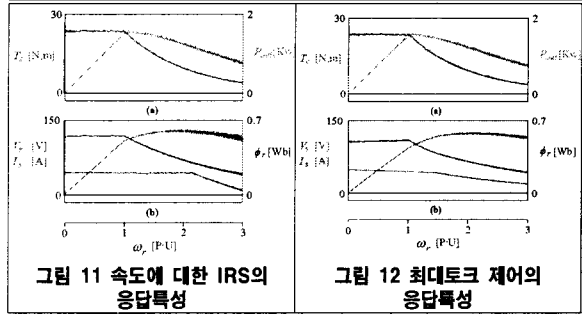


그림 11 속도에 대한 IRS의 응답특성

그림 12 최대토크 제어의 응답특성

그림 13에서 약계자 영역에서 최대토크 제어 제어의 전체 전류가 IRS 보다 작은 값으로 나타나므로 최대토크 제어의 효과가 나타난다. 그림 14는 약계자 영역에서 최대토크 제어와 IRS의 단위 전류당 토크와 자속의 비교를 나타낸다. 그림 14(a)는 단위전류당 토크를 비교한 결과를 나타내며 본 연구에서 제시한 최대토크 제어가 종래의 IRS 보다 토크가 크게 나타나고 있다. 그림 14(b)는 단위 전류당 자속을 비교한 결과이며 최대토크 제어가 종래의 IRS 보다 자속이 크게 나타나고 있다.

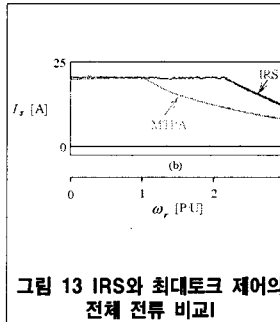


그림 13 IRS와 최대토크 제어의 전체 전류 비교

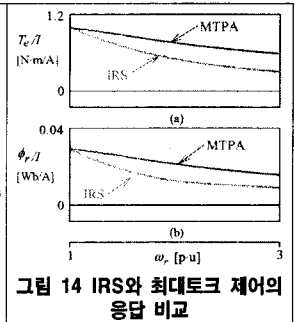


그림 14 IRS와 최대토크 제어의 응답 비교

## 7. 결론

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 AFNIS를 이용하여 고정 속도제어를 할 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. AFNIS는 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.

### [참고 문헌]

- [1] 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.
- [2] 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.
- [3] 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.
- [4] 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.